И. Я. Брейдо

ЛАМПОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ СИГНАЛОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 384

И. Я. БРЕЙДО

ЛАМПОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ СИГНАЛОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

В брошюре рассматриваются устройства, называемые усилителями постоянного тока, предназначенные в основном для усиления слабых электрических сигналов постоянной полярности (направления), ток или напряжение которых может изменяться в течение промежутков времени от многих часов до долей микросекунды. Такие усилители широко применяются в устройствах автоматического контроля и регулирования производственных процессов.

Брошюра рассчитана на подготовленных радиолюбителей, интересующихся применением радиоэлектронных устройств в народном хозяйстве.

Брейдо Исаак Яковлевич

ЛАМПОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ СИГНАЛОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Редактор *Ю. И. Грибанов* Техн. редактор *Н. И. Борунов*

Сдано в набор 2/VIII 1960 г. Подписано к печати 19/X 1960 г.
Т-12873 Бумага 84×108¹/₃₂ 4,51 печ. л. Уч.-изд. л. 5
Тираж 50 000 экз. (2-й завод 10 001—50 000)
Цена 20 коп Заказ 34.

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ВВЕДЕНИЕ

В современной промышленности широко используются системы автоматического контроля и регулирования производственных процессов. Применение этих систем особенно быстро увеличивается в годы семилетки, когда наша промышленность встала на путь всесторонней автоматизации технологических процессов и всемерного внедрения систем телеуправления и телеизмерения.

Авторегулирующие системы содержат следующие основные элементы:

1. Датчики, отображающие параметры того или иного процесса в виде электрического сигнала. Типичные примеры датчиков: общеизвестная термопара (датчик температуры), фотоэлемент (датчик освещенности).

2. Усилители, предназначенные для увеличения мощности сигнала. Усилители часто выполняются отдельными блоками: усилитель тока или напряжения, усилитель мощности.

3. Исполнительные механизмы, регулирующие ход процесса и управляемые усиленным сигналом датчика.

4. Контрольные приборы, показывающие или записывающие.

Сигналы, вырабатываемые датчиками, весьма часто представляют собой медленно меняющиеся по величине токи постоянного направления (так называемые сигналы постоянного тока). Величина этих токов обычно находится в пределах 10^{-15}—10^{-6} *а*, тогда как для приведения в действие измерительных или записывающих контрольных приборов необходимы токи порядка 10^{-4} *а*, а для управления исполнительными механизмами — более 10^{-2} *а*.

Соответствующее усиление осуществляется радиоэлектронными устройствами, получившими название **усилителей постоянного тока** (УПТ). Хотя входной сиг-

нал этих усилителей постоянен лишь по направлению, название УПТ вошло в широкий технический обиход, поэтому мы его и будем употреблять в дальнейшем. Важное значение УПТ для авторегулирующих систем объясняется еще и их почти идеальной фазовой характеристикой в области низких частот, являющихся основными компонентами сигналов управления.

Не только промышленность, но и ряд важнейших отраслей физики, биологии, астрономии и других наук также нуждаются в УПТ для усиления сигналов датчиков, с помощью которых ведется наблюдение объектов исследования. Достаточно упомянуть ионизационные методы исследования излучений, приборы для регистрации биотоков, масс-спектрометры и разнообразные фотоэлектрические установки, чтобы получить представление о значении научных применений УПТ, охватывающих астрономию и ядерную физику, биологию и металлургию и т. д. В ядерной энергетике, геологической разведке нефти и других полезных ископаемых также широко используются разнообразные УПТ для целей измерения и управления.

Многообразие применений УПТ обусловливает то, что число различных видов аппаратуры, в которых УПТ является важным элементом, весьма велико. Приведем лишь некоторые примеры.

В сочетании с фотоэлектрическими датчиками (фотоэлементами, умножителями) УПТ применяются в установках автоматического контроля толщины, плотности, цвета, прозрачности и других свойств листовых материалов (тканей, пластмасс, бумаги и пр.), а также в установках автоматического спектрального анализа в металлургии, для контроля и автоматического регулирования температуры, для измерения яркости и цветности экранов кинескопов, для массового измерения параметров источников света. Авторегулирующие и контрольные устройства, основанные на применении радиоактивных изотопов, также содержат УПТ как одну из важнейших частей. Таковы, например, гамма- и бета-уровнемеры, толщиномеры, плотномеры и ряд соответствующих регуляторов для химического, нефтяного и металлургического производств.

Изложенные краткие сведения показывают, что УПТ представляют собой один из основных видов радиоэлектронной аппаратуры, все шире используемой в народном хозяйстве по мере развития автоматизации производства. Настоящая брошюра имеет целью ознакомление широких

кругов радиолюбителей и работников промышленности, стремящихся использовать радиоэлектронику для совершенствования методов производства, со схемами и свойствами ламповых УПТ, с их особенностями, которые следует учитывать в основных видах применений. В брошюре содержатся также описания нескольких практически проверенных УПТ.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ДАТЧИКИ ВХОДНОГО СИГНАЛА УПТ

Большая часть систем авторегулирования и контроля производственных процессов может быть представлена двумя основными схемными вариантами, показанными на рис. 1. Как уже упоминалось во введении, многие датчики

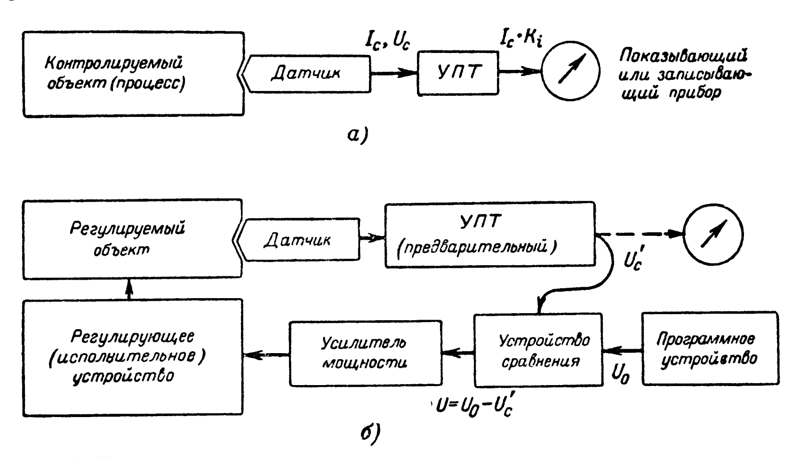


Рис. 1. Блок-схема контрольного (измерительного) устройства (*а*) и схема авторегулирующего устройства (*б*).

вырабатывают слабые, сравнительно медленно изменяющиеся токи постоянного направления, для усиления которых и применяются УПТ. Перечислим наиболее распространенные в промышленном и научном применении виды датчиков.

Для контроля и регулирования тепловых процессов датчиками обычно служат термопары или термосопротивления.

Чувствительность первых (при выполнении из металлов) составляет 1—2 *мв* на 100° С при внутреннем сопротивлении обычно менее 100 *ом*. Сигнал, вырабатываемый датчиками на термосопротивлениях, сильно зависит от их материала и схемы включения; для металлов изменение сопротивления составляет приблизительно 0,4% на 1° С. Значительно большей чувствительностью обладают полупроводниковые датчики температуры.

Для контроля механических напряжений применяются так называемые тензодатчики. Их можно разделить на три основные группы: а) с меняющимся при деформации сопротивлением; б) с меняющимися при деформации магнитными свойствами; в) пьезоэлектрические, на электродах которых при деформации возникают заряды. Напряжение сигналов тензодатчиков групп «а» и «б» составляет около 1 *мв* при сравнительно низком внутреннем сопротивлении. Пьезоэлектрические датчики вырабатывают напряжение порядка 1 *в* при условии, что вход УПТ обладает весьма большим сопротивлением (10^{11}—10^{12} *ом*) и малой емкостью.

Контроль химического состава и концентрации некоторых растворов производится с помощью датчиков pH, реагирующих на концентрацию водородных ионов. Эти датчики, в которых основной материал электродов защищен стеклянными мембранами от соприкосновения с растворами, требуют весьма высокого входного сопротивления УПТ (10^{11}—10^{13} *ом*) при чувствительности порядка 0,5 *в*.

Контроль многих производственных процессов производится при помощи фотоэлектрических датчиков, в число которых входят: а) фотоэлементы трех видов (с внешним фотоэффектом — вакуумные, с запирающим слоем — вентильные, и фотосопротивления) и б) фотоэлектронные умножители.

Вакуумные фотоэлементы, характеристики которых наиболее устойчивы, применяются весьма широко, в том числе и в прецизионных устройствах, например в автоматических спектроанализаторах. Чувствительность этих фотоэлементов составляет 20—80 *мка/лм*, но так как рабочие световые потоки обычно малы, то отдача тока лежит в пределах 10^{-7}—10^{-13} *а*. Благодаря тому что внутреннее сопротивление вакуумных фотоэлементов велико, имеется возможность применять УПТ с большим входным сопротивлением, что, как будет показано ниже, облегчает задачу усиления столь малых токов.

Вентильные фотоэлементы (селеновые, меднозакисные,

германиевые и др.) обладают, как правило, низким сопротивлением и развивают э. д. с. от 2—4 до 100—200 *мв* (при освещенности 100 *лк*). Для обеспечения линейной зависимости их фототока от освещенности требуется низкое сопротивление нагрузки. Поэтому ламповые усилители обычно соединяют с такими фотоэлементами через соответствующие преобразователи. То же в основном относится к фотосопротивлениям.

Для работы со световыми сигналами особо малой интенсивности применяются фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Высокое выходное сопротивление ФЭУ и их большая отдача позволяют применять УПТ с высокоомным входом. Заметим, что сочетание УПТ с ФЭУ образует наиболее чувствительный, достаточно компактный и универсальный прибор для измерения очень слабого светового излучения вплоть до 10^{-12} *лм* (света звезд).

В настоящее время для измерения ряда показателей производственных процессов (уровня жидкости, ее плотности, толщины материалов, качества их обработки и окраски и т. д.) применяются радиоактивные излучения, в основном гамма- и бета-лучи. Датчиками (детекторами) этих излучений служат ионизационные приборы — газоразрядные счетчики, ионизационные камеры, а также ряд сцинтилляторов, например кристаллы иодистого натрия в сочетании с ФЭУ.

Газоразрядные счетчики под действием гамма- и бета-излучений вырабатывают импульсы, средняя частота которых пропорциональна интенсивности излучения, воздействующего на счетчик. При помощи простой интегрирующей цепи импульсы могут быть преобразованы в ток постоянного направления; величина тока пропорциональна средней частоте импульсов и обычно находится в пределах 10^{-5}—10^{-8} *а*. Для измерения таких токов служат сравнительно простые УПТ.

В ионизационных камерах под действием проникающих излучений протекают токи порядка 10^{-16}—10^{-7} *а*; эти токи пропорциональны интенсивности излучения, объему камеры, давлению наполняющего газа и зависят также от состава газа и материала стенок камеры. Внутреннее сопротивление ионизационной камеры весьма велико, что дает возможность пользоваться УПТ с высокоомным входом. Для усиления токов менее 10^{-12} *а* применяются УПТ со специальными электрометрическими входными каскадами. Ионизационная камера в сочетании с УПТ представляет

собой одно из наиболее точных и надежных устройств для измерения интенсивности радиоактивных излучений.

В электровакуумной промышленности большое значение имеет «контроль вакуума», точнее измерение малых давлений газа в диапазоне 10^{-3}—10^{-8} *мм рт. ст.* Измерения эти производятся при помощи ионизационных вакуумметров. Датчиками служат видоизмененные ионизационные камеры, непосредственно сообщающиеся с объемом, в котором измеряется давление. В камеру помещается источник ионизирующего излучения. При условии его устойчивости ток камеры прямо пропорционален давлению газа. Поэтому шкалу показывающего прибора, включенного на выходе УПТ, можно градуировать непосредственно в единицах давления.

Источниками ионизирующего излучения могут служить накаленный катод, окруженный сетчатым анодом (электроны ионизируют газ, а ионы пролетают сквозь сетку на «коллектор» камеры), или радиоактивный препарат, испускающий альфа-лучи (в этом случае камеру—датчик вакуумметра иногда называют альфатроном). Образующиеся в газе положительные ионы улавливаются отрицательно заряженным коллектором, который соединен со входом УПТ.

Несколько особо стоят задачи усиления так называемых биотоков, т. е. электрических сигналов, возникающих непосредственно в тканях и органах в процессе их жизнедеятельности. Эти сигналы имеют время изменения от секунд до долей миллисекунды и напряжения приблизительно от 0,5 *мкв* (токи мозга и нервов) до 0,1 *в* (токи сердца). Вход УПТ подключается к исследуемым органам при помощи соответствующих (неполяризующихся) электродов. Входное сопротивление УПТ может быть невысоким, порядка 10^{3}—10^{6} *ом*; ввиду малой мощности сигнала к усилителю предъявляются весьма жесткие требования высокой устойчивости и малого шума.

В табл. 1 дана сводка систем и основных параметров датчиков, предназначенных для контроля различных процессов.

Рассматривая приведенные в табл. 1 датчики как элементы входной цепи УПТ, можно большую их часть разделить по электрическим свойствам на три группы. Датчики первой группы назовем датчиками тока; они имеют весьма большое внутреннее сопротивление и могут развивать напряжение порядка 10^{-1}—10^{1} *в* на весьма высокоом-

Таблица 1

Параметры контролируемых или регулируемых процессов и явлений	Датчики	Сигналы датчиков: Напряжение, *в*	Сигналы датчиков: Ток, *а*	Выходное сопротивление датчика, *ом*
Механическое напряжение (сжатие, растяжение, кручение) или перемещение (вибрация, сдвиг)	Магнитный	10^{-3}—10^{-2}	10^{-3}—10^{-5}	10—1 000
	Индуктивный	10^{-3}—10^{-2}	10^{-3}—10^{-5}	10—1 000
	Пьезоэлектрический	10^{-2}—1	10^{-12}—10^{-8}	10^{6}—10^{10}
	Емкостный	10^{-4}—10^{-3}	10^{-12}—10^{-8}	10^{7}—10^{18}
Температура, световое или инфракрасное излучение	Термоэлектрический	10^{-2}—10^{-4}	10^{-6}—10^{-3}	10—1 000
Световое излучение непосредственно или как функция других процессов (механических, ядерных и др.)	Вакуумный фотоэлемент	10^{-4}—10^{2}	10^{-14}—10^{-3}	∞
	Вентильный фотоэлемент	10^{-3}—10^{-1}	10^{-6}—10^{-3} 10^{-4}—1 *а/лм*	10—100
	Фотосопротивление	—	10^{-2}—10^{-1} *а/лм·в*	10^{3}—10^{7}
	Фотоэлектронный умножитель	10^{-4}—10^{2}	10^{-7}—10^{-2}	∞
Концентрация растворов, ход химических реакций	Электрохимический (поляризованные электроды)	0,1—0,5	10^{-12}—10^{-10}	10^{9}—10^{12}
Интенсивность ядерного или рентгеновского излучения непосредственно или как функция других процессов	Ионизационная камера	10^{-3}—10^{2}	10^{-17}—10^{-7}	∞
Биотоки	Неполяризованные электроды	10^{-6}—10^{-1}	10^{-8}—10^{-3}	10—1 000
Ток или напряжение электрического авторегулирующего устройства (скорости вращения двигателя, стабилизатора напряжения и др.)	Потенциометр, мост с нелинейными звеньями	10^{-3}—10^{-1}	10^{-8}—10^{-4}	10^{2}—10^{6}
Газовое давление (степень вакуума)	Ионизационный	10^{-2}—1	10^{-10}—10^{-4}	$\approx 10^{7}$

ной (10^6—10^{13} *ом*) нагрузке, причем ток датчика не зависит от сопротивления нагрузки. Вторую группу можно назвать датчиками напряжения; они имеют небольшое сопротивление, развивают на низкоомной (10^2—10^4 *ом*) нагрузке напряжение 10^{-3}—10^{-2} *в*, и их характеристики сильно зависят от нагрузки. В третью группу входят пьезоэлектрические и емкостные датчики; их можно назвать датчиками заряда, так как именно величина заряда на их электродах отображает интенсивность контролируемого ими явления. Для датчиков третьей группы требуется, как правило, высокоомная, но малоемкостная нагрузка.

Вход УПТ согласовывается с датчиком при помощи соответствующих сопротивлений или преобразователей, которые описаны в следующей главе.

ГЛАВА ВТОРАЯ

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. ОСОБЕННОСТИ ЛАМПОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Первой особенностью большей части ламповых УПТ является то, что установленная в их входном каскаде электронная лампа, анодный ток которой управляется сеточным напряжением, должна работать в схеме усиления тока. Очевидно, что вход УПТ должен содержать некоторый преобразователь, в котором ток сигнала создавал бы напряжение, в достаточной мере превышающее собственный шум и флуктуации сеточной цепи входной лампы. Эта задача решается несколькими способами, рассматриваемыми в этой главе.

Постоянство направления (полярности) входного сигнала, т. е. наличие в нем постоянной составляющей, обусловливает вторую особенность УПТ: его каскады нельзя связывать ни емкостным, ни трансформаторным переходом; межкаскадные соединения должны быть гальваническими (это не относится к УПТ с преобразованием сигнала постоянного тока в переменный).

Третья особенность УПТ (вернее недостаток) состоит в том, что исходный — «нулевой» уровень напряжения или тока на их выходе подвержен самопроизвольному измене-

нию: в УПТ происходит так называемый дрейф нуля. Факторы, обусловливающие дрейф и меры борьбы с ним, рассматриваются в гл. 3.

Дрейф ограничивает возможность получения большого коэффициента усиления УПТ с гальванической межкаскадной связью. С этой целью разработаны системы УПТ, в которых входной сигнал постоянного тока как бы модулирует несущие колебания (обычно низкочастотные), усиливаемые затем соответствующим усилителем.

Таким образом, структурная схема УПТ может быть представлена следующими основными вариантами:

1) Датчик — преобразователь сигнала постоянного тока в сигнал постоянного напряжения — входной каскад — промежуточный усилитель напряжения с гальванической связью — оконечный каскад (усилитель мощности);

2) Датчик — преобразователь сигнала постоянного тока в переменное (или импульсное) напряжение — входной каскад — промежуточный избирательный усилитель — оконечный каскад (усилитель мощности).

Усилитель в целом или отдельные его узлы могут быть охвачены отрицательной обратной связью.

2. ВХОДНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Вполне очевидно, что простейшим преобразователем ток—напряжение может служить сопротивление, через которое пропускается измеряемый ток; как известно, напряжение на сопротивлении $U_R = RI$. Принципиальная схема входного устройства, работающего по этому способу, называемому еще способом прямого усиления, приведена на рис. 2.

Измеряемый ток I_x пропускается через сопротивление $R_{вх}$, включенное на входе лампового вольтметра постоянного тока (рис. 2). Измеряя напряжение $U_{вх}$, находим ток сигнала

$$I_x = \frac{U_{вх}}{R_{вх}}. \qquad (1)$$

Например, если $U_{вх} = 0{,}2$ *в* при $R_{вх} = 10^{10}$ *ом*, то $I_x = 2 \cdot 10^{-11}$ *а*. Диапазон измерений легко менять, переключая входные сопротивления. Этот способ широко применяется в ламповых измерителях малых токов (пикоамперметрах или так называемых ламповых гальванометрах). Показывающий прибор может быть градуирован непосредственно

в единицах измеряемой величины. В установках автоматического контроля и регулирования, УПТ которых работают по этому способу, обеспечивается непрерывное и с относительно малой временной задержкой изменение выходного сигнала при изменении входного.

Чувствительность способа ограничена главным образом трудностью изготовления стабильных сопротивлений более 10^{12} *ом* и недостаточной устойчивостью измерения малых напряжений в столь высокоомных цепях. По литературным данным порог чувствительности может быть доведен до

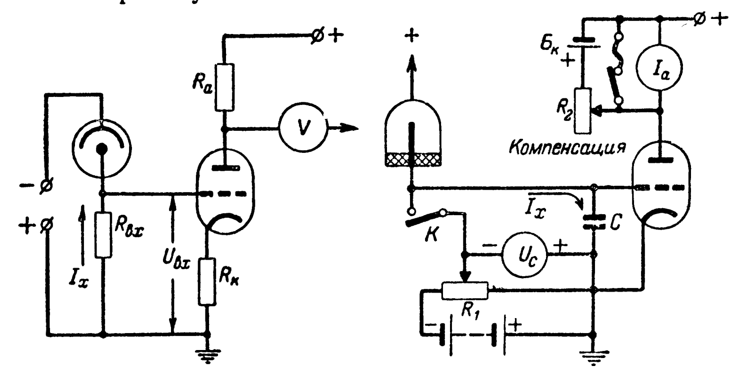


Рис. 2. Принципиальная схема „прямого" измерения малых токов.

Рис. 3. Принципиальная схема лампового электрометра.

10^{-14} *а*. Опыт показывает, однако, что устойчивое усиление сигнала обеспечивается при токах порядка $0{,}5 \cdot 10^{-12}$ *а* и более. Способ этот имеет существенные преимущества (простоту схем и невысокую стоимость аппаратуры) при использовании его в диапазоне токов порядка 10^{-12}—10^{-6} *а*.

Гораздо большая чувствительность достигается при использовании электрометрического метода измерения малых токов, основанного на определении скорости стекания или натекания заряда.

В первом варианте электрометрического метода измеряемый ток I_x изменяет заряд конденсатора C в цепи сетки лампы (рис. 3). Происходящее при этом изменение напряжения на сетке ΔU_c можно определить, зная крутизну характеристики лампы S и измерив изменение ее анодного тока ΔI_a:

$$\Delta U_c = \frac{\Delta I_a}{S}. \tag{2}$$

Изменение заряда конденсатора происходит не мгновенно, а в течение времени t, протекшего с момента размыкания ключа K до момента отсчета $\Delta I_а$. Определив t при помощи, например, секундомера, находим ток

$$I_x = \frac{\Delta U_с C}{t} = \frac{\Delta I_а C}{St} \qquad (3)$$

(в этой и последующих формулах ток дается в амперах, напряжение в вольтах, крутизна в амперах на вольт, емкость в фарадах, время в секундах).

Чем меньше ток сигнала, тем меньше должна быть емкость конденсатора C и тем чувствительнее должен быть показывающий прибор, измеряющий ΔI_a; для точного измерения малых значений ΔI_a обычно используются схемы компенсации начальной составляющей анодного тока (на рис. 3—батарея $Б_к$ и сопротивление R_2).

Найденная по формуле (3) величина I_x является суммой токов сигнала и утечки. Очевидно, что для достижения высокой чувствительности необходимо высокое входное сопротивление лампы. С этой целью сконструированы специальные электрометрические лампы, входное сопротивление которых нередко превосходит 10^{16} *ом*.

Приведем числовой пример измерения малого тока этим способом. Пусть крутизна характеристики лампы составляет 20 *мка/в*, входная емкость устройства (включая емкость подсоединенного датчика) равна 20 *пф*, а измеренная за время 30 *сек* величина $\Delta I_а = 1$ *мка*. Тогда

$$I_x = \frac{10^{-6} \cdot 20 \cdot 10^{-12}}{20 \cdot 10^{-6} \cdot 30} \approx 3{,}3 \cdot 10^{-14} \text{ а}.$$

Чувствительность лампового электрометра этого типа ограничивается главным образом самопроизвольным изменением сеточного и анодного токов, т. е. дрейфом. Тщательно выполненные приборы с индивидуально подобранными лампами позволяют измерять токи порядка 10^{-17} *а*. В условиях заводских лабораторий сравнительно простые ламповые электрометры дают возможность измерения токов порядка 10^{-15}—10^{-14} *а*. При этом величина $\Delta I_а$, которую регистрирует показывающий прибор, обычно составляет около 1 *мка*. Следовательно, усиление тока достигает в ламповом электрометре 10^9 (миллиарда раз!).

В другом варианте электрометрического метода измеряется не время t, а частота периодической разрядки или

зарядки калиброванного конденсатора C_1, т. е. величина $f=1/t$. На рис. 4 показана упрощенная схема соответствующего прибора. В момент включения питания анодный ток лампы вызывает срабатывание реле P. Его контакты замыкаются, подавая на сетку лампы отрицательное напряжение, запирающее ее (причем происходит отпускание реле) и заряжающее конденсатор C_1. Измеряемый ток I_x компенсирует заряд конденсатора, и лампа через некоторое время открывается; но при этом реле снова срабатывает, заряжает конденсатор и запирает лампу и т. д. Если напряжение на заряженном конденсаторе равно $U_з$, а то напряжение, при котором открывается лампа и срабатывает реле, равно U_0, то

$$I_x = C(U_з - U_0)(f_1 - f_0), \quad (4)$$

где f_1 — частота срабатываний при наличии сигнала I_x;
f_0 — собственная частота срабатываний прибора, обусловленная утечками конденсатора и сеточной цепи лампы.

Срабатывания регистрируются каким-либо счетным прибором. Для токов порядка 10^{-8} *а* и более вместо вакуумной лампы можно применить тиратрон тлеющего разряда.

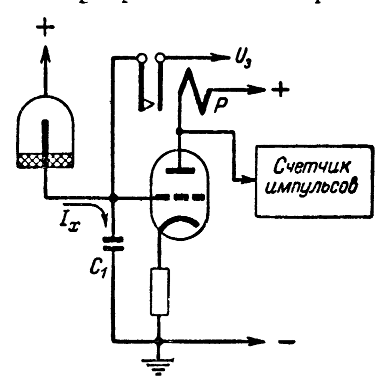


Рис. 4. Ламповый электрометр со счетчиком зарядо-разрядных периодов конденсатора.

Чувствительность аппаратов, работающих по этому варианту, тем выше, чем меньше C_1 и f_0. Величина последней зависит от утечек по изоляции входа электрометра и от сеточных токов лампы. Как известно, современные синтетические изоляционные материалы типа полистирола и фторопласта (тефлона) позволяют конструировать изоляторы с сопротивлением порядка 10^{18} *ом*. Следовательно, чувствительность электрометров данного варианта ограничивается в основном сеточным током лампы (точнее, его флуктуациями); опыт показывает, что конструирование прибора на токи менее 10^{-14} *а* представляет серьезные затруднения.

Недостатком обоих описанных электрометрических методов является значительная затрата времени на каждый замер, а также отсутствие прямого отсчета величины тока. Поэтому разработаны электрометрические УПТ, в которых время изменения заряда конденсатора измеряется радиоэлектронным устройством.

Схема такого аппарата показана на рис. 5. Измерительный цикл начинается с размыкания контактов реле P_1, приводимого в действие генератором импульсов, калиброванных по длительности и скважности. Ток сигнала начинает заряжать конденсатор C_1. Через заданное время (на-

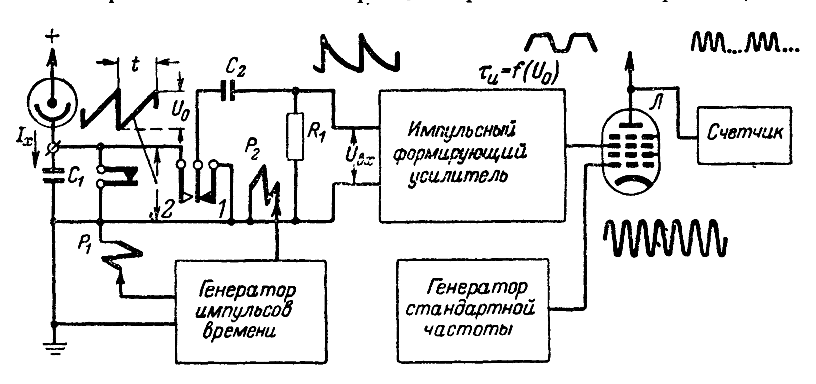


Рис. 5. Ламповый электрометр с импульсным преобразователем.

пример, 1 *сек*) второй импульс переводит контакты реле P_2 из положения *1* в положение *2* (вслед за этим контакты реле P_1 снова замыкаются). Напряжение конденсатора C_1 поступает на вход усилителя через звено C_2R_1 в виде импульса приблизительно треугольной формы.

Усилитель содержит амплитудно-ограничительные каскады. В них сигнал преобразуется в трапецеидальные импульсы (так называемое «преобразование напряжение—время»), длительность которых пропорциональна току сигнала. С выхода усилителя трапецеидальный импульс поступает на сетку лампы *Л* нормально запертого затворного каскада и открывает его, пропуская на счетчик периодические импульсы-«метки» стандартной частоты (например, 100 *кгц*) от генератора. По окончании трапецеидального импульса затворный каскад закрывается; число зарегистрированных счетчиком «меток» является мерой тока I_x.

Описанный цикл может автоматически повторяться, что

позволяет следить за изменением тока. Возможна прямая градуировка счетчика в единицах тока. В системах авторегулирования импульсы-«метки» поступают в интегрирующую схему, вырабатывающую сигнал управления. При этом имеется возможность большого усиления мощности сигнала.

Сложность электрометрических приборов этого вида окупается сравнительно большой быстротой их действия, высокой точностью (погрешность менее 2%), а также возможностью применять во входном каскаде обычные приемно-усилительные лампы. Порог чувствительности зависит от сопротивления изоляции конденсатора C_1 и реле, а также от амплитуды паразитных импульсов, возникающих при срабатывании реле. Имеются данные об измерении токов порядка 10^{-16} *а* с хорошей повторяемостью результатов.

Метод прямого усиления сигналов постоянного тока и электрометрические методы мало применимы в случаях, когда источник сигнала имеет малое внутреннее сопротивление и является не датчиком тока, а датчиком малой э. д. с. Нередко такая э. д. с. может вызвать лишь малые изменения анодного тока входной лампы УПТ, не превышающие амплитуды естественных флуктуаций. Однако известно, что радиотехнические средства позволяют улавливать сигналы, амплитуда которых меньше амплитуды «фона» хаотических шумов, если сигналы имеют вид периодических колебаний. Следовательно, в данном случае слабую «постоянную» э. д. с. сигнала целесообразно преобразовать в периодические колебания.

Наиболее простым способом такого преобразования является способ периодического прерывания сигнала при помощи механического вибратора. Измеряемый ток прерывается обычно с частотой от 50 до 400 *гц* и преобразуется в прямоугольные колебания. Последние поступают на вход узкополосного усилителя. Выходное напряжение усилителя выпрямляется синхронным детектором, который управляется колебаниями, приводящими в действие прерыватель *П* (рис. 6). Этот способ привлекателен тем, что применение узкополосного усилителя низкой частоты дает возможности уменьшения шума и большого усиления сигнала. Однако это достоинство не может быть полностью реализовано из-за возникновения паразитных импульсов в моменты замыкания и размыкания контактов прерывателя. Паразитные импульсы удается существенно уменьшить (но не унич-

тожить), применяя платиновые или золотые контакты и помещая прерыватель в атмосферу инертного газа (аргона, неона) или в вакуум.

Лучшие устройства данного типа имеют предельную чувствительность около 10^{-9} *а* при входном сопротивлении 1 *Мом* (по напряжению сигнала ~1 *мв*). Чувствительность УПТ этого вида при входном сопротивлении около 5 *ом* может быть доведена до 10^{-8} *в*. При этом, однако, наблюдается значительная зависимость амплитуды преобразованного сигнала от внешней температуры, а также дрейф на несколько процентов в час, по-видимому, вследствие старения контактных поверхностей.

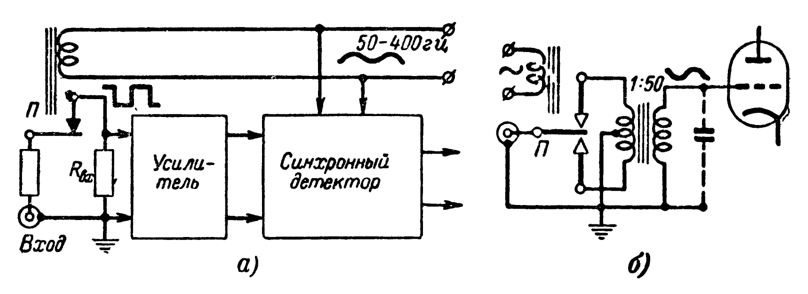


Рис. 6. УПТ со входным вибропреобразователем.
а — с реостатным входом; *б* — с трансформаторным входом.

УПТ с прерывателями на входе применяются обычно в сочетании с низкоомными датчиками, например с термопарами в дистанционных терморегуляторах. Они используются также в биологических исследованиях при работе с нервно-мышечными тканями и в некоторых электротехнических измерениях.

Вместо механических прерывателей иногда применяют германиевые транзисторы, работающие в ключевом режиме. Однако из-за высокого уровня собственных шумов и непостоянства параметров этих транзисторов чувствительность УПТ составляет 10^{-9} *а* или более. Достоинством прерывателей на транзисторах является отсутствие механических подвижных элементов. В связи с появлением кремниевых транзисторов можно полагать, что параметры этих прерывателей существенно улучшатся.

Значительное применение имеют также модуляционные методы преобразования сигнала постоянного тока в переменное напряжение. Их отличительная особенность заключается в том, что один из элементов входной цепи УПТ,

например сопротивление или конденсатор, периодически, с заданной частотой изменяется. Благодаря этому на вход усилителя поступает переменное напряжение, пропорциональное сигналу датчика. Наиболее распространены реостатные (с переменным сопротивлением) и емкостные модуляторы.

В простейшем виде реостатный модулятор представляет собой пакет из угольных пластинок $M_р$, включенный последовательно со входным сопротивлением $R_{вх}$ (рис. 7) или первичной обмоткой входного трансформатора. Модулятор $M_р$ подвергается периодическому сжатию и растяжению при помощи вибратора B, приводимого в действие электромагнитом $Э$, в результате чего сопротивление моду-

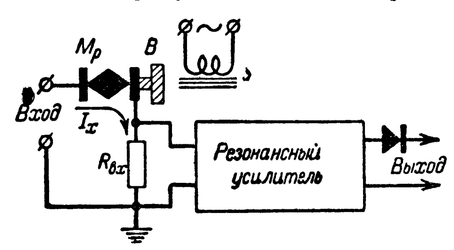


Рис. 7. УПТ с входным реостатным модулятором.

лятора меняется с частотой вибрации (вместо электромагнита может быть использован пьезокристалл). Напряжение сигнала на входном сопротивлении УПТ оказывается модулированным, причем глубина модуляции (или коэффициент преобразования, равный отношению переменной и постоянной составляющих) тем больше, чем больше отношение максимального и минимального сопротивления модулятора. Для усиления переменной составляющей применяется резонансный усилитель, настроенный на частоту вибрации.

Для того чтобы модулятор работал устойчиво, он должен находиться в сухой атмосфере или в вакууме при постоянной температуре и, кроме того, его детали должны быть изготовлены из специальных сортов электроугля. Вследствие высоких собственных шумов угольных модуляторов они обеспечивают порог чувствительности лишь порядка 10^{-6} *а* (около 100 *мкв* при входном сопротивлении 100 *ом*). Достоинством угольных модуляторов является относительная простота их конструкции.

Лучшими параметрами обладают полупроводниковые модуляторы, возбуждаемые переменным магнитным полем или прерывистым светом.

Первые основаны на известном эффекте Холла, заключающемся в изменении сопротивления полупроводников в магнитном поле. Небольшая тонкая пластинка $M_п$, например сурьмянистого индия включается последовательно с первичной обмоткой входного трансформатора резонансного усилителя (рис. 8). Пластинка находится в переменном магнитном поле электромагнита *Э* и ее сопротивление меняется с частотой, равной двойной частоте возбуждения электромагнита. Результирующая переменная составляю-

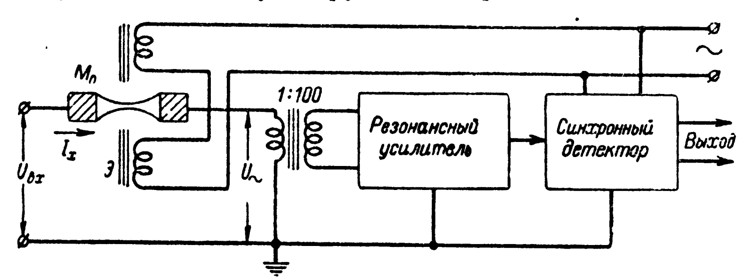


Рис. 8. УПТ с входным полупроводниковым модулятором.

щая модулированного сигнала поступает на резонансный усилитель через повышающий трансформатор. Предельная чувствительность этого модулятора порядка 10^{-7} *а* при входном сопротивлении 100 *ом* (т. е. около 10^{-5} *в*).

Полупроводниковый модулятор, основанный на изменении сопротивления некоторых полупроводников под действием света, имеет принципиальную схему, отличающуюся от схемы на рис. 8 лишь тем, что вместо магнитного поля на пластинку воздействует периодически прерываемый световой поток (например, от неоновой лампочки, питаемой переменным током). Пластинка представляет собой сернисто-кадмиевое или селенисто-кадмиевое фотосопротивление, сходное с известными фотосопротивлениями типа ФСК. Для обеспечения глубокой модуляции (т. е. высокого коэффициента преобразования) сигнала оно должно иметь высокое отношение темнового сопротивления к сопротивлению в освещенном состоянии. Усилители с подобными модуляторами имеют предельную чувствительность до 10^{-12} *а* (порядка 1 *мв* при входном сопротивлении 10^9 *ом*).

Гораздо большую чувствительность УПТ обеспечивают емкостные модуляторы.

Принципиальная схема УПТ с емкостным модулятором на входе показана на рис. 9. Сигнал поступает в *RC*-звено, конденсатор которого $C_{\sim}$, называемый динамическим или виброконденсатором, имеет электрод, колеблющийся с частотой 50—1 000 *гц* под действием, например, электромагнита *Э*. Вследствие колебаний емкости на входном сопротивлении усилителя R_2 возникает переменное напряжение $U_{\sim}$, пропорциональное напряжению входного сигнала U_0. Соотношение между $U_{\sim}$ и U_0 зависит от глубины

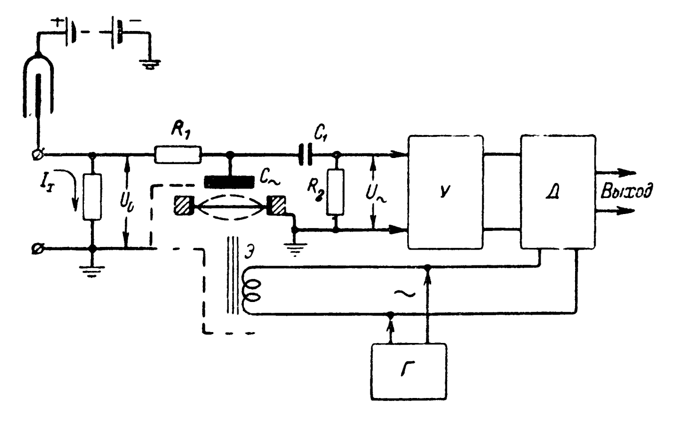


Рис. 9. УПТ с емкостным модулятором.

модуляции емкости, сопротивления и других факторов (обычно $U_{\sim}/U_0 \approx 0{,}2$). Напряжение $U_{\sim}$ усиливается при помощи узкополосного усилителя низкой частоты *У* и поступает на синхронный фазочувствительный детектор *Д*. Последний управляется переменным напряжением генератора *Г*, возбуждающего колебания подвижного электрода виброконденсатора. После детектирования сигнал поступает либо на измерительный прибор, либо, если УПТ является элементом авторегулирующей системы, на усилитель мощности или же на схему сравнения.

Преобразование сигнала по этому методу сопровождается меньшими шумовыми помехами, чем при реостатной модуляции. При использовании входной лампы с малым сеточным током порог чувствительности УПТ с емкостным модулятором по току достигает 10^{-16} *а* при высоком входном

сопротивлении (или 10^{-3} *в* по напряжению). Однако для получения столь высоких показателей требуется весьма тщательное выполнение всех частей виброконденсатора и специальная обработка поверхности пластин. Для устранения атмосферных влияний и электрических помех конденсатор должен быть заключен в герметичный экранирующий кожух, из которого удаляется воздух

Помимо трудностей при изготовлении динамического конденсатора, недостатком УПТ этой системы является большая постоянная времени входа, обусловливающая значительное запаздывание изменения сигнала на выходе относительно изменения входного сигнала (или, что то же, узкую «полосу пропускания» УПТ).

В заключение этого краткого обзора укажем, что УПТ с модуляторами и прерывателями на входе в большей своей части значительно уступают по чувствительности и особенно по быстроте действия УПТ с прямым усилением. Однако благодаря тому, что основное усиление производится в них устойчивыми видами усилителей, обеспечивающими к тому же возможность получения большой мощности сигнала на выходе, УПТ со входными преобразователями имеют не менее широкое применение, чем УПТ с прямым усилением. Оба вида УПТ непрерывно совершенствуются, причем если в УПТ прямого усиления в основном разрабатываются схемы стабилизации «нулевой точки» и коэффициента усиления, то в УПТ с преобразователями совершенствуются конструкции модуляторов, улучшается технология их изготовления и изыскиваются материалы, обеспечивающие их лучшую устойчивость против температурных и атмосферных влияний и меньшее старение.

Из приводимой сводной таблицы видов усиления постоянного тока и основных свойств УПТ с различными входными преобразователями (табл. 2) можно видеть, что входные преобразователи различных видов согласуются с соответствующими датчиками и поэтому не исключают, а дополняют друг друга. Так, УПТ прямого усиления с высокоомным входом согласуются с датчиками тока, например с вакуумными фотоэлементами; УПТ с механическими вибропреобразователями согласуются с низкоомными датчиками и т. д. Указываемый в табл. 2 минимальный входной сигнал представляет собой приблизительно десятикратную величину собственного шума и дрейфа УПТ (за 1 *ч*, после предварительного прогрева), отнесенную ко входу,

Таблица 2

Вид усиления	Входной преобразователь	Вид преобразования	Минимальный входной сигнал	Время установления, *сек*	Оптимально согласующиеся датчики
Прямое усиление постоянного тока	Сопротивление	Постоянный ток—постоянное напряжение	10^{-13} *а*, 10^{-2} *в*	⩽10	Ионизационная камера, вакуумный фотоэлемент, ФЭУ, поляризованные электроды, пьезоэлектрические датчики
То же	Емкость (статический электрометр)	Постоянный ток—постоянное напряжение—время	10^{-16} *а*, 10^{-2} *в*	10—600	То же
Импульсное с выпрямлением на выходе	Емкость и синхронный переключатель (импульсный электрометр)	Постоянный ток—частота (или длительность) импульсов	10^{-15} *а*, 10^{-2} *в*	10—100	
Низкочастотное (резонансное или узкополосное) с выпрямлением на выходе	Вибропрерыватель	Постоянное напряжение—переменное (или импульсное) напряжение	10^{-8} *а*, 10^{-3} *в*	⩽5	Вентильный фотоэлемент, термопара, фотосопротивление, биологические препараты
То же	Модулятор (полупроводниковый)	Постоянный ток—переменное напряжение	10^{-10} *а*, 10^{-3} *в*	⩽5	То же
	Виброконденсатор	Постоянное напряжение (или ток)—переменное напряжение	10^{-15} *а*, 10^{-3} *в*	≈20	Любые

т. е. такой сигнал, в который эти помехи вносят погрешность не более 10%. Время установления указано для минимального сигнала.

3. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПТ

Конкретное назначение УПТ определяет основные технические данные, которыми должен обладать усилитель. От этих данных зависит выбор схемы, ламп и других схемных деталей. Рассмотрим наиболее важные параметры усилителя и их взаимосвязь.

Предельная чувствительность по току $I_{вх.мин}$ или напряжению $U_{вх.мин}$ показывает наименьшую величину входного тока или напряжения, которую с помощью УПТ можно измерить или усилить до необходимого уровня. Она указывается в амперах или вольтах; например: для лампового электрометра $I_{вх.мин} \approx 10^{-16}$ *а*, для лампового гальванометра $I_{вх.мин} \approx 10^{-13}$ *а*, $U_{вх.мин} \approx \approx 10^{-2}$ *в*. Заданная предельная чувствительность определяет выбор лампы входного каскада и тип преобразователя.

Рабочий диапазон УПТ выражается либо непосредственно в единицах тока входного сигнала, либо в единицах входного напряжения $U_{вх}$ и сопротивления $R_{вх}$. Очевидно, что входной ток $I_{вх} = U_{вх}/R_{вх}$. В случае электрометра соответственно указываются допустимые величины $\Delta U_{вх}$ и $C_{вх}$. Указываются также число поддиапазонов и их пределы. Заданными рабочим диапазоном и предельной чувствительностью определяются режим входной лампы и выбор элементов схемы входного каскада (сопротивления, емкости, типа переключателя).

Крутизна характеристики $S_у$. Этот параметр представляет собой отношение тока $I_{вых}$ на выходе УПТ к соответствующему входному напряжению $U_{вх}$ и выражается обычно в миллиамперах на вольт. Вместе с $S_у$ указывается максимально допустимая величина $I_{вых.макс}$ или $U_{вх.макс}$, а также нелинейность характеристики $I_{вых} = = f(U_{вх})$; например: $S_у = 100$ *ма/в*, $U_{вх.макс} = 0{,}2$ *в*, нелинейность менее 2%. Заданная величина $S_у$ определяет выбор схемы и ламп промежуточного усилителя и оконечного каскада.

Усиление тока $K_т$ представляет собой отношение

$$K_т = \frac{\Delta I_{вых}}{I_{вх}}. \qquad (5)$$

Обычно указывают величину $K_т$ только по наиболее чувствительному поддиапазону. Очевидно, что для любого поддиапазона

$$K_т = R_{вх} S_у. \qquad (6)$$

Дрейф нулевой точки УПТ[1] выражается эквивалентным входным напряжением $U_{др}$ (в вольтах или милливольтах), которое вызвало бы изменение выходного тока, равное наблюдаемому в течение времени t (обычно в час или сутки) сползанию $\Delta I_{вых.др}$. Следовательно,

$$U_{др} = \frac{\Delta I_{вых.др}}{S_у t}. \qquad (7)$$

Иногда дрейф указывают в процентах шкалы прибора, включенного на выходе УПТ. Как правило, дрейф больше 10% в час недопустим, поэтому должно соблюдаться неравенство $U_{вх.мин} \geqslant 10\ U_{др}$.

Время установления показывает длительность промежутка времени между моментом ступенчатого изменения сигнала и установлением соответствующего нового уровня тока (напряжения) на выходе УПТ. Время установления УПТ прямого усиления зависит главным образом от RC входной цепи. В УПТ со входными модуляторами или прерывателями оно зависит еще и от временных данных детекторов (демодуляторов).

Частотная характеристика УПТ отображает его способность усиливать сигналы от быстропротекающих процессов. Нижняя граница частотной характеристики УПТ всегда составляет 0 *гц*. В электронно-лучевых осциллографах и в ряде других устройств часто применяются УПТ прямого усиления с частотным диапазоном 0 *гц*—5 *Мгц* и более. Обычно вместе с данными частотной характеристики указываются входная емкость и входное сопротивление УПТ. Чем шире частотный диапазон УПТ, тем меньше его время установления.

---

[1] Нулевой точкой называют начальный ток (или напряжение) на выходе УПТ, установленный при отсутствии входного сигнала.

Выходное сопротивление $R_{вых}$ или $Z_{вых}$ указывается для тех УПТ, которые предназначены для управления исполнительным устройством или для питания внешнего измерительного аппарата.

Кроме перечисленных, технические данные УПТ включают сведения о симметричном или несимметричном входе и выходе, о начальном напряжении на выходе относительно «земли», о системе питания и потребляемой мощности, о габаритах и весе.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ВХОДНЫЕ КАСКАДЫ УПТ

4. ТРЕБОВАНИЯ К ЛАМПАМ ВХОДНЫХ КАСКАДОВ

Входные каскады УПТ являются первым каскадом усиления сигнала, преобразованного по одному из рассмотренных в гл. 2 способов. Чем выше заданная чувствительность УПТ, тем более высокие требования предъявляются к параметрам входной лампы. Характер требований зависит от способа преобразования.

Основные требования к лампам входного каскада УПТ прямого усиления:

1) минимально возможные флуктуации тока управляющей сетки (не более 10% наименьшего измеряемого тока);

2) малая входная емкость;

3) максимально возможное сопротивление изоляции сетки (не менее чем в 100 раз больше включенного на входе сопротивления);

4) устойчивая во времени эмиссия катода (малый дрейф и минимальные флуктуации анодного тока).

Основные требования к лампам входного каскада УПТ со входным преобразователем:

1) минимально возможный собственный шум;

2) отсутствие микрофонного эффекта на частоте вибрации преобразователя;

3) малые флуктуации тока управляющей сетки;

4) малая входная емкость.

Как видно из этих данных, наиболее жесткие требования к лампе входного каскада предъявляют УПТ прямого усиления. Во входных каскадах тех видов УПТ, в которых применены преобразователи или модуляторы (кроме емкостного), обычно используются приемно-усилительные

лампы, удовлетворяющие требованиям микрофонных усилителей. Для УПТ со входным емкостным модулятором, как правило, требуются электрометрические лампы во входном каскаде.

Главными факторами, ограничивающими чувствительность УПТ прямого усиления, являются сеточный ток входной лампы и самопроизвольное изменение во времени (дрейф) ее анодного тока.

5. СЕТОЧНЫЕ ТОКИ И СПОСОБЫ ИХ УМЕНЬШЕНИЯ

Согласно современным данным сеточные токи обусловлены как электронными, так и ионными процессами. Рассмотрим кратко эти процессы.

Небольшая часть испускаемых катодом электронов обладает такой начальной скоростью, которая достаточна для того, чтобы преодолеть отталкивающее действие сетки и попасть на нее; этим обусловливается электронный сеточный ток. Уменьшение температуры катода до величины около 1 000° К снижает начальную скорость электронов, и этот электронный ток сетки почти прекращается уже при смещении около 1 *в*.

Катод может испускать положительные ионы, которые притягиваются отрицательно заряженной управляющей сеткой, образуя «ионный» сеточный ток. Эту часть тока управляющей сетки можно уменьшить при помощи так называемой «катодной сетки», помещенной в лампе между катодом и управляющей сеткой. На катодную сетку подается небольшой положительный потенциал. Полезно также понижение температуры катода.

Электроны анодного тока могут ионизировать атомы остаточного газа; образующиеся при этом положительные ионы притягиваются управляющей сеткой. Кроме того, часть электронов, соударяясь с анодом, может вызвать испускание мягких (слабо проникающих) рентгеновских лучей, которые в свою очередь могут вырывать электроны из сетки. Эти компоненты сеточного тока уменьшаются снижением анодного напряжения до 5—8 *в*, т. е. до величины, которая меньше потенциала ионизации остаточных газов. Однако при слишком низком анодном напряжении может увеличиваться электронная составляющая сеточного тока.

Под действием как внешнего, так и испускаемого катодом света управляющая сетка может испускать электроны (фотоэффект сетки), что сдвигает ее потенциал в положи-

тельную сторону. Кроме того, сетка может также эмиттировать электроны в результате ее подогрева лучеиспусканием катода. Для борьбы с этой частью сеточных токов лампу следует защищать от внешнего света, а также снижать температуру ее катода.

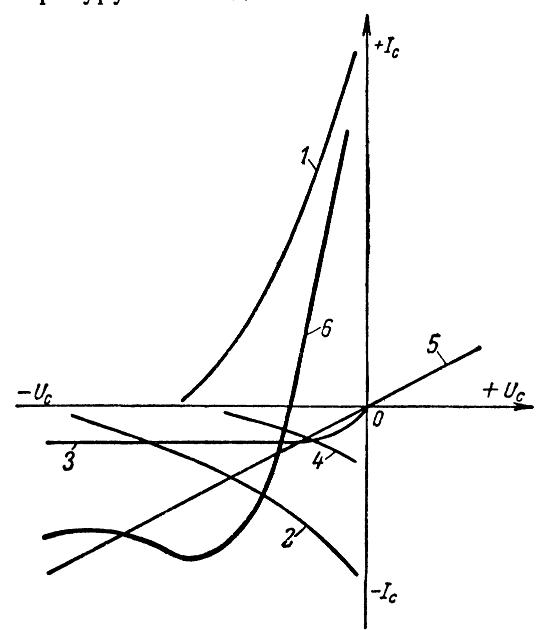


Рис. 10. Зависимость компонентов сеточного тока лампы от смещения на сетке.

1 — термоэлектроны катода; *2* — ионизация газа и ионы, испускаемые анодом; *3* — термоионы катода, термоэлектроны и фотоэлектроны сетки; *4* — вторичная эмиссия сетки и катода; *5* — утечка по изоляции; *6* — суммарный сеточный ток. Знак $+I_c$ означает поступление электронов на сетку, а знак $-I_c$ — уход электронов или нейтрализацию их заряда положительными ионами.

Под действием электронной бомбардировки анод лампы может испускать небольшое количество ионов. Вероятность этого процесса уменьшается при низком анодном напряжении.

Под действием ионной бомбардировки сетка и катод лампы могут испускать вторичные электроны. Вероятность этого процесса уменьшается при низкой температуре катода и малом анодном напряжении.

Кроме токов, обусловленных внутриламповыми процессами, по изоляции сеточного вывода лампы и по ее бал-

Таблица 3

Тип лампы	Электродная система	Напряжение накала, *в*	Ток накала, *ма*	Напряжение анода, *в*	Напряжение катодной сетки, *в*	Смещение управляющей сетки, *в*	Ток анода, *мка*	Крутизна характеристики, *мка/в*	Ток управляющей сетки, *а*	Коэффициент усиления	Входная емкость, *пф*	Потенциал свободной сетки[2], *в*	Размеры, *мм*	Где выпускается (страна)
ЭМ-5	Двойной подогревный тетрод[1]	3,15	110	5	4	—3	85	50	$5\cdot10^{-15}$	~2	1,6	—2	20×65	СССР
ЭМ-3	Тетрод	3	120	6	4	—3	60	50	$3\cdot10^{-15}$	1,2	5,2	—2,5	50×150	СССР
41	Тетрод	1,25	10	4,5	4,5	—3	250	20	$5\cdot10^{-15}$	1	2	—	10×40	США
1Э1П	Тетрод	1	45	6	4	—3	100	25	$7\cdot10^{-14}$	1,3	3,5	—1,6	20×65	СССР
2Э2П	Двойной тетрод[1]	2	55	6	4	—3	45	15	$8\cdot10^{-14}$	1,3	4	—1,6	20×65	СССР
ЭМ-4	Триод	1,3	24	8	—	—1,7	130	80	$8\cdot10^{-14}$	2,2	4	—1,3	20×65	СССР
5800	Тетрод	1,25	10	4,5	3,4	—3	~20	15	$\sim10^{-15}$	—	2	—	10×40	США
5803	Триод	1,25	10	7,5	—	—1,7	100	150	$2\cdot10^{-14}$	—	4	—	10×40	США

[1] Данные одного тетрода.
[2] Потенциал свободной сетки—напряжение, при котором характеристика сеточного тока проходит через нуль.

лону могут перемещаться заряды, образуя токи утечки. Для уменьшения последних необходимо предохранять баллон лампы от влаги и загрязнений. Входная часть УПТ должна монтироваться на высококачественных изоляторах (из полистирола, тефлона, янтаря). Полезно окружать провода сеточной цепи металлическими цилиндрами («охранными кольцами»), на которые подавать напряжение, равное по знаку и величине смещению управляющей сетки: этим ослабляются поля, вызывающие перемещение зарядов по изоляторам.

На рис. 10 показана зависимость отдельных компонентов сеточного тока от смещения на сетке (в произвольном масштабе).

Значительная часть перечисленных мер борьбы с сеточными токами может быть принята лишь при конструировании ламп и в процессе их изготовления. Такие специальные «электрометрические лампы» имеют сопротивление изоляции сетки по 10^{15}—10^{17} *ом* и сеточные токи порядка 10^{-15}—10^{-13} *а*. Имеются данные, что отборные экземпляры выпускаемых электрометрических ламп могут иметь еще меньшие сеточные токи, порядка 10^{-16}—10^{-17} *а*. В табл. 3 приводятся параметры некоторых отечественных и зарубежных электрометрических ламп.

Из табл. 3 видно, что электрометрические лампы имеют малый коэффициент усиления и малую крутизну. Этот недостаток обусловлен конструктивными особенностями, за счет которых достигаются высокое входное сопротивление и малые сеточные токи.

6. ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЖИМ II

В ряде практических применений УПТ нет необходимости измерять токи меньше 10^{-11}—10^{-12} *а*. В таких случаях могут быть использованы лампы из числа приемно-усилительных, обладающие относительно высоким сопротивлением изоляции управляющей сетки. Так, например, лампы типов 6Ж1Ж и 6Ж7 имеют сопротивление изоляции сетки порядка 10^{-12}—10^{-13} *ом*, а некоторые их экземпляры — 10^{14} *ом*. При номинальных режимах питания сеточный ток этих ламп составляет 10^{-7}—10^{-8} *а*, но при понижении напряжения накала до 3,2—4 *в* сеточный ток резко снижается. Дальнейшее снижение сеточного тока до величины порядка 10^{-12} *а* достигается подбором анодного напряжения. На рис. 11 приведена усредненная кривая *1* зависимости сеточного тока от анодного напряжения (при триодном

включении — экранирующая сетка соединена с анодом) ламп типа 6Ж7, пригодных для указанного диапазона.

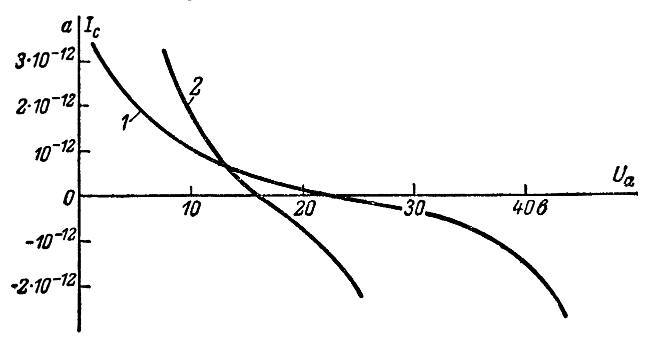


Рис. 11. Зависимость сеточного тока ламп типа 6Ж7 от анодного напряжения (в схеме на рис. 12).
1 — лампы высокого качества; *2* — посредственные лампы.

Для сравнения приведена кривая *2*, относящаяся к «посредственным» экземплярам ламп, которые, однако, пригодны для входных каскадов УПТ, работающих в диапазоне 10^{-10}—10^{-9} *а*.

При анодных напряжениях, близких к точке пересечения кривой *1* с осью абсцисс, и напряжении накала около 3,5 *в* (в так называемом электрометрическом режиме II) на входе каскада можно включать сопротивления до 10^{11} *ом*, что позволяет строить УПТ с чувствительностью порядка 10^{-12} *а*. Практика показала, что лампы типов 6Ж7 и 6Ж1Ж, а также многие экземпляры ламп типа 6Ж1П устойчиво и долговечно работают во входных каскадах, собранных по схеме катодного повторителя со сравнительно большим сопротивлением в цепи катода (рис. 12). Коэффициент передачи таких простых каскадов около 0,7. Линейный в пределах ±2% участок по $U_{вх}$ составляет до +1,2 *в* при входном сигнале положительной полярности и до —0,6 *в* при отрицательной.

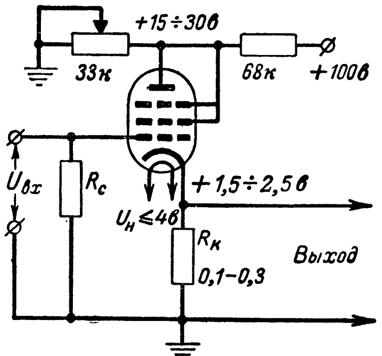


Рис. 12. Входной каскад на лампе типа 6Ж7 или 6Ж1Ж в электрометрическом режиме II.

7. ИЗМЕРЕНИЕ СЕТОЧНОГО ТОКА

Существуют два основных способа измерения сеточных токов: а) по времени изменения заряда входной емкости лампы $C_с$ и б) по падению напряжения на высокоомном сопротивлении $R_с$, включенном в цепи сетки. Первый способ обычно применяется для диапазона токов менее 10^{-12} *а*, а второй — для токов большей величины. Необходимо иметь в виду, что при этих измерениях сеточная цепь лампы должна быть тщательно экранирована, а сама лампа еще и защищена от света.

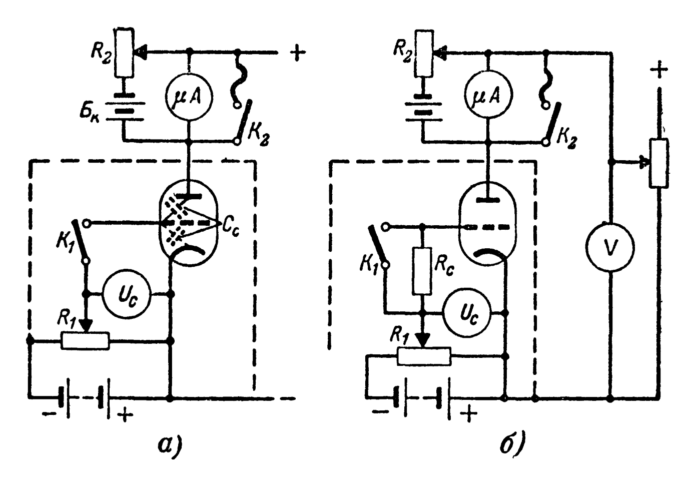


Рис. 13. Схемы измерения сеточного тока.

а — по времени стекания заряда; *б* — по падению напряжения на высокоомном сопротивлении.

Схема измерения сеточного тока по первому способу показана на рис. 13,*а*. Перед началом измерения контакты K_1 замкнуты и на сетку лампы подается регулируемое смещение $U_с$ с движка потенциометра R_1. В анодной цепи лампы включен микроамперметр; начальная составляющая анодного тока компенсируется батареей $Б_к$ и переменным сопротивлением R_2.

При замкнутом ключе K_2 производится грубая, а при разомкнутом—точная компенсация. Изменив смещение $U_с$ на величину $\Delta U_с$, мы изменим анодный ток $I_а$ на величину

ΔI_a. Из этих данных можно найти крутизну характеристики лампы

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}.$$

Когда контакты K_1 будут разомкнуты, на емкости сеточной цепи сохранится заряд $Q_c = C_c U_c$. Этот заряд будет изменяться под действием суммарного сеточного тока I_c лампы. Следовательно, будет изменяться и напряжение на сетке, о чем можно судить по изменению анодного тока ($\Delta U_c = \Delta I_a / S$). Зная входную емкость и измерив время Δt, в течение которого произошло изменение анодного тока, можно вычислить средний сеточный ток:

$$I_c = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta U_c C_c}{\Delta t} = \frac{\Delta I_a C_c}{\Delta t S}. \qquad (8)$$

Схема измерения сеточного тока по второму способу показана на рис. 13,*б*. Перед началом измерения ключ K_1 замыкают, и при данном анодном напряжении определяют крутизну характеристики S. Затем ключ K_1 размыкают. Сеточный ток, протекая через сопротивление R_c, вызывает падение напряжения $\Delta U_c = R_c I_c$. О величине ΔU_c судят, как и при первом способе, по изменению анодного тока ΔI_a, которое произошло после размыкания ключа. Таким образом, сеточный ток

$$I_c = \frac{\Delta U_c}{R_c} = \frac{\Delta I_a}{S R_c}. \qquad (9)$$

При измерении сеточного тока обоими способами следует учитывать не только его величину, но и направление. Последнее определяется по знаку изменения анодного тока. Если при размыкании ключа имеем $+\Delta I_a$, то сетка приобретает положительный заряд за счет сеточного тока, который в этом случае принято называть отрицательным (иногда „ионным“). Если же имеем $-\Delta I_a$ (т. е. анодный ток уменьшается при размыкании ключа K_1), то сетка приобретает отрицательный заряд за счет сеточного тока, который называют положительным или электронным (см. рис. 11).

8. ВЫСОКООМНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Качество УПТ, работающих по схеме прямого усиления, существенно зависит от технических показателей высокоомных сопротивлений, включаемых в сеточную цепь входной лампы. К этим сопротивлениям предъявляются требования максимально возможной устойчивости их величины при изменении температуры и влажности окружающей среды, малого старения, а также минимального вольт-эффекта, выражающегося в изменении сопротивления при изменении рабочего напряжения.

Из выпускаемых отечественной промышленностью высокоомных сопротивлений широкого применения в сеточной цепи входной лампы УПТ можно использовать сопротивления типов КЛМ и КВМ. Эти сопротивления выпускаются различной величины — от 10^8 до 10^{12} *ом* с соотношениями номинальных значений 1—1,5—2,2—3,3—4,7—6,8—10, на максимальное рабочее напряжение до 300 *в*, с наибольшим вольт-эффектом 0,1% на 1 *в*, рабочим диапазоном температур от —40 до +60° С, наибольшим температурным коэффициентом 0,25% на 1° С и коэффициентом старения приблизительно 2,5% в год.

9. ДРЕЙФ НУЛЯ

Практически всем видам УПТ присущ серьезный недостаток, выражающийся в той или иной степени неустойчивости «нулевой точки», т. е. в изменении уровня выходного напряжения с течением времени при отсутствии сигнала (или при неизменном сигнале). Этот так называемый временной дрейф апериодичен и может иметь любой знак.

В УПТ прямого усиления (с гальванической межкаскадной связью) временной дрейф обусловлен главным образом изменением эмиссии катода входной лампы (катодный дрейф) и медленными флуктуациями сеточного тока в электрометрических схемах. Для второго и последующих каскадов катодный дрейф имеет второстепенное значение, если они работают при достаточно большом сигнале. Неустойчивость нуля, обусловленную изменением величины деталей или режима анодного питания, можно радикально уменьшить, применяя высококачественные сопротивления и стабилизированные источники. Поэтому мы не будем отдельно рассматривать этот вид дрейфа.

В УПТ с контактными или емкостными преобразователями катодный дрейф не влияет на устойчивость нуля.

Однако состояние поверхностей контактов прерывателя или пластин виброконденсатора изменяется в процессе работы (под действием атмосферы или в результате процессов старения). Этот «контактный дрейф» (точнее, дрейф контактного потенциала) может быть существенно уменьшен применением особо чистых золота или платины в качестве материала (или покрытия) контактов и пластин. При этом прерыватель или виброконденсатор следует помещать в вакуум или в герметичный кожух, наполненный инертным газом.

С целью сравнительной оценки дрейфа различных УПТ его величину, наблюдаемую на выходе усилителя, необходимо «привести» ко входу усилителя. Пусть при отсутствии сигнала было замечено, что нуль показывающего прибора УПТ отклонился на N процентов шкалы (либо полного выходного тока) за время t часов. Если чувствительность УПТ для полного отклонения прибора составляет U_0 милливольт, то приведенный ко входу дрейф составит:

$$U_{\text{др}} = \frac{U_0 N \cdot 0,01}{t} \ [\textit{мв/ч}]. \qquad (10)$$

В дальнейшем будут указываться именно приведенные ко входу величины дрейфа. В схемах замещения $U_{\text{др}}$ рассматривается как паразитное напряжение помехи, включенное последовательно с источником входного сигнала УПТ.

Современные УПТ с контактными входными преобразователями имеют дрейф в пределах 0,05—0,5 *мв/ч* в зависимости от конструкции и качества изготовления. В УПТ с тщательно изготовленным входным емкостным модулятором удается снизить дрейф до $\pm 0,1$ *мв* в сутки. УПТ прямого усиления, как правило, имеют дрейф порядка ± 10 *мв* в сутки, причем главным фактором, препятствующим дальнейшему улучшению устойчивости, является катодный дрейф.

Различают катодный дрейф двух основных видов: 1) обусловленный нестабильностью температуры катода вследствие изменения тока подогревателя и 2) обусловленный изменением свойств катода.

Дрейф первого вида (температурный) составляет около 10 *мв* на 1% изменения тока подогревателя. Благодаря тепловой инерции катодов изменение нулевого уровня на выходе УПТ происходит с задержкой на 5—40 *сек* после

изменения режима подогревателей. Снижение этого вида дрейфа достигается стабилизацией тока накала входных ламп, например при помощи бареттера.

Необходимо, однако, иметь в виду, что в «горячих» деталях ламп в течение первых десятков часов работы происходят изменения кристаллической структуры, особенно в местах контактов с выводами. В связи с этим может изменяться сопротивление подогревателей катодов и нитей бареттеров. Для уменьшения влияния этого процесса на стабильность УПТ рекомендуется делать сопротивление источника питания накала равным (или большим) сопро-

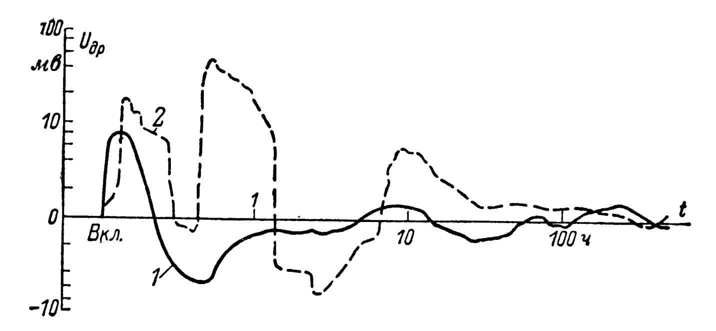


Рис. 14. Кривые дрейфа УПТ.
Вкл — момент включения; величина $U_{\text{др}}$ приведена ко входу.

тивлению подогревателя путем включения последовательных сопротивлений.

Опыт показал, что предварительная тренировка ламп и применение последовательного сопротивления в цепи накала позволяет снизить температурный дрейф до 1 *мв* на 1% изменения питающего напряжения; в большинстве случаев это вполне удовлетворительная величина, которая позволяет пользоваться для стабилизации напряжения накала УПТ простым феррорезонансным стабилизатором. Однако для УПТ, обладающих чувствительностью полного отклонения порядка 10 *мв*, дополнительно применяются еще схемы с компенсацией температурного дрейфа. Заметим, что в катодном повторителе температурный дрейф в $1/SR_{к}$ раз меньше, чем в каскаде с анодной нагрузкой.

Дрейф второго вида проявляется как медленное, происходящее в течение многих часов или даже суток сползание «нулевой точки». Для иллюстрации на рис. 14 приве-

дены результаты записи дрейфа $U_{др}$. Кривая *1* соответствует усилителю, уже бывшему ранее в эксплуатации более 100 *ч*. Наибольший дрейф наблюдается в первые часы работы после включения УПТ, затем наступает относительное равновесие и дрейф составляет приблизительно ± 2 *мв* за 10—30 *ч*. Кривая *2* соответствует тому же УПТ, в который был установлен новый экземпляр входной лампы. Дрейф здесь сопровождался относительно быстрыми скачками, амплитуда которых уменьшалась с течением времени и которые практически прекратились через 50—70 *ч* работы. Такой ход кривой свидетельствует о процессе установления в лампе, о ее «тренировке». Заметим, что не у каждого экземпляра лампы тренировка столь значительно снижает дрейф; поэтому наладка УПТ сопряжена с подбором ламп. Для уменьшения потерь времени при этом целесообразно производить предварительную 100-часовую тренировку группы ламп в режиме, близком к рабочему.

Еще не все причины дрейфа этого вида выяснены; имеются основания полагать, что он обусловлен изменением как эмиссии катода, так и параметров лампы. С другой стороны, лабораторные исследования показывают, что эмиссионная способность оксидного слоя при рабочей температуре $<1\,000°$ К почти не изменяется в течение многих тысяч часов; кроме того, современные схемы (например, катодный повторитель) малочувствительны к небольшим изменениям крутизны или коэффициента усиления лампы.

Возможно, что в реальной лампе эмиссия оксидного слоя катода все же изменяется в результате реакций с материалом подложки, а также с газами, выделяющимися из нее. Весьма вероятно изменение с течением времени и сопротивления граничного слоя между оксидным покрытием и подложкой катода; это изменение, до некоторой степени сходное с изменением сопротивления автоматического смещения, может вызывать изменения анодного тока.

Дрейф второго вида может быть частично обусловлен и причинами механического характера, а именно, небольшими смещениями электродов, в особенности подогревателя и сетки относительно катода. Скачки кривой *2* (рис. 14) в большой мере объясняются этим «механическим дрейфом». Склонность лампы к механическому дрейфу легко обнаружить, ударяя по ней карандашом в разных направлениях: если после удара нуль уходит более чем на 20 *мв*

(приведенных ко входу), то лампа, вероятно, окажется непригодной для первых каскадов УПТ.

В настоящее время доступными мерами снижения дрейфа второго вида являются предварительная тренировка ламп и их отбор по механическому дрейфу. Существенно уменьшается дрейф при понижении напряжения накала и анодного тока, т. е. при работе ламп в так называемом микротоковом режиме. Кроме того, разработаны схемы УПТ, в которых автоматически производится периодическая компенсация дрейфа. Однако эти УПТ сложны по схеме и конструкции, и поэтому предстоит еще большая работа по усовершенствованию электродных систем и технологического процесса изготовления стабильных ламп, специально предназначенных для УПТ.

10. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ВХОДНЫХ КАСКАДОВ

Входные каскады УПТ прямого усиления. Схема входного каскада на электрометрической лампе типа 1Э1П со входными переключаемыми сопротивлениями показана на рис. 15. Питание накала лампы производится от стабилизированного источника, например, от делителя в цепи стабилизатора анодного питания. Начальное смещение на управляющую сетку U_{c2} снимается с сопротивления R_1, по которому протекает ток накала (анодный ток и ток катодной сетки относительно малы и ими при расчете пренебрегают). Сопротивление анодной

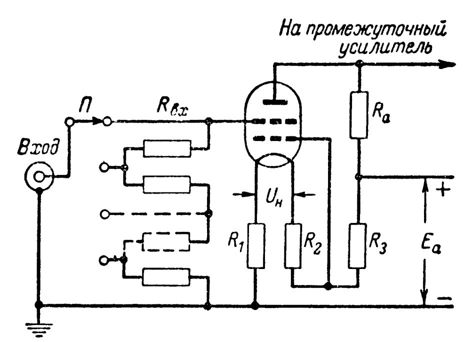


Рис. 15. Входной каскад на электрометрической лампе.

Для лампы типа 1Э1П: $R_1 \approx R_2 = 65$ *ом*; $R_3 = 265$ *ом*; $R_a = 100$ *ком*; $E_a = 19$ *в*; $R_{вх}$ (сумма всех сопротивлений) — до 10^{12} *ом*.

нагрузки $R_а$ обычно выбирают в пределах 20—200 *ком*. Приближенный расчет сопротивлений в цепи питания лампы производится на основании ее табличных данных по следующим формулам:

$$R_1 = \frac{U_{с2}}{I_н}; \tag{11}$$

$$R_2 = \frac{U_{с1} - U_н}{I_н}; \tag{12}$$

$$R_3 = \frac{U_а - U_н + I_а R_а}{I_н} - (R_2 + R_1). \tag{13}$$

В случае триода, например, 1Э3П полагают $R_2=0$.

Так как характеристики отдельных экземпляров ламп несколько различаются, то оптимальный режим устанавливают подбором сопротивления R_1, а если окажется необходимым, то и R_2. Для измерения малых токов по времени заряда — разряда входной емкости вместо сопротивлений $R_{вх}$ включается контактная пара (см. рис. 3), с помощью которой на сетку лампы подается начальное смещение. Сопротивление R_1 берут переменным и параллельно ему подключают вольтметр. Регулируя R_1, определяют относительную крутизну УПТ:

$$S_у = \frac{\text{Показания выходного прибора УПТ}}{\Delta U_{с2}}.$$

Если выходной прибор градуирован, например, в миллиамперах, то $S_у$ дается в миллиамперах на вольт. Далее измеряется «ток входа» электрометра (см. § 5), который при дальнейших измерениях алгебраически вычитают из тока сигнала.

Лампы типов 6Ж1Ж и 6Ж7 и др., работающие в электрометрическом режиме II, дают хорошие результаты в схеме катодного повторителя. Входной каскад, часто применяемый в измерителях малых токов (пикоамперметрах), показан на рис. 16,*а*.

Каскад отличается относительно большим сопротивлением $R_к$ в катодной цепи и тем, что при помощи потенциометра $R_а$ подбирается анодное напряжение, при котором сеточный ток лампы равен нулю. Контроль ведут по изменению напряжения $U_к$ в момент замыкания

входного сопротивления (при отсутствии сеточного тока изменения $U_к$ не происходят).

Схема катодного повторителя имеет следующие существенные для входного каскада достоинства:

1. Сопротивление изоляции сетки $R_{и.с}$ сравнительно мало влияет на входное сопротивление лампы, в этой схеме приблизительно равное $R_{и.с}/(1-K_п)$, где $K_п = SR_к/(1+SR_к)$. Так, например, лампа типа 6Ж1Ж имеет сопротивление изоляции управляющей сетки $R_{и.с} > 10^{12}$ *ом*. Ее крутизна (в данном режиме схемы) $S = 0{,}1$ *ма/в*. При

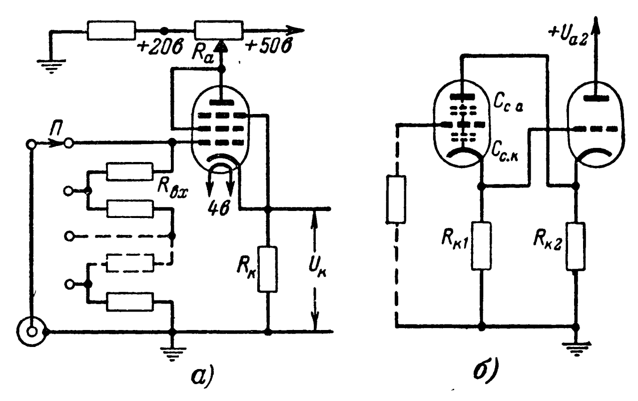


Рис. 16. Входные каскады по схеме катодного повторителя.

$R_к = 200$ *ком* $K_п = 0{,}1 \cdot 200/(1+0{,}1 \cdot 200) \approx 0{,}95$. Отсюда входное сопротивление лампы составляет $10^{12}/(1-0{,}95) \gg 10^{13}$ *ом*.

2. Емкость сетка—катод лампы $C_{с.к}$ частично компенсируется благодаря обратной связи в схеме катодного повторителя:

$$C'_{с.к} \approx C_{с.к}(1-K_п). \tag{14}$$

Для компенсации емкости сетка—анод можно применять схему, приведенную на рис. 16,*б*, в которой потенциалы анода и катода изменяются вместе с потенциалом управляющей сетки, благодаря чему динамическая емкость лампы

$$C'_{с.к.а} \approx C_{с.к}(1-K_{п1}) + C_{с.а}(1-K_{п1}K_{п2}); \tag{15}$$

здесь $K_{п1}$ и $K_{п2}$ — коэффициенты передачи первого и второго каскадов.

3. Дрейф по изменению напряжения накала уменьшается в несколько раз по сравнению с лампой, работающей с анодной нагрузкой.

В схеме катодного повторителя дают хорошие результаты электрометрические триоды типа ЭМ4. Питание накала этих ламп необходимо производить от отдельной обмотки силового трансформатора, лучше через мостовой выпрямитель на германиевых диодах (ДГ-Ц21). На выходе моста целесообразно включить сухой гальванический элемент (ФБС, «Сатурн») или же малогабаритный аккумуляторный щелочной элемент. Ток подзаряда буферного элемента должен на 5—10% превышать ток накала лампы. Нить накала лампы соединяется с элементом через ограничительное сопротивление. Сопротивление катодной нагрузки 200—500 *ком* соединяется с положительным концом нити. Анодное напряжение лампы 1Э3П в этой схеме можно устанавливать от 6 до 20 *в* (последнее — при входном сопротивлении не более 10^{10} *ом*).

В тех случаях, когда чувствительность УПТ составляет 10^{-8} *а* или более, входной каскад может быть собран на подогревных триодах типа 6Н1П или 6Н2П, причем напряжение накала рекомендуется брать порядка 3,5—4,5 *в* (вместо 6,3 *в*) и анодное напряжение в пределах 25—60 *в*. Входное сопротивление при этом должно быть не более 100 *Мом*.

Во входных каскадах, работающих на двойных триодах, возможна компенсация температурного дрейфа. Одна из часто применяемых схем такой компенсации (схема Миллера) приведена на рис. 17. Здесь левый (по схеме) триод является рабочим, а правый — компенсационным. Ход дрейфа без компенсации показан кривой *1* на рис. 17,*б*; можно видеть, что увеличение напряжения накала $U_н$ на 0,5 *в* равносильно положительному входному сигналу около 10 *мв*. Благодаря тому, что смещение на сетку компенсирующего триода поступает только с части сопротивления R_1, а сопротивление в анодной цепи мало, его анодный ток при увеличении $U_н$ возрастает более круто, нежели анодный ток рабочего триода. Поэтому, регулируя потенциометры R_1, R_2 и R_4, возможно выбрать такой режим компенсирующего триода, при котором изменение напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 за счет изменения его анодного

тока будет приблизительно равно приведенному напряжению дрейфа рабочего триода. Таким образом, сетка рабочего триода получит добавочное смещение, компенсирую-

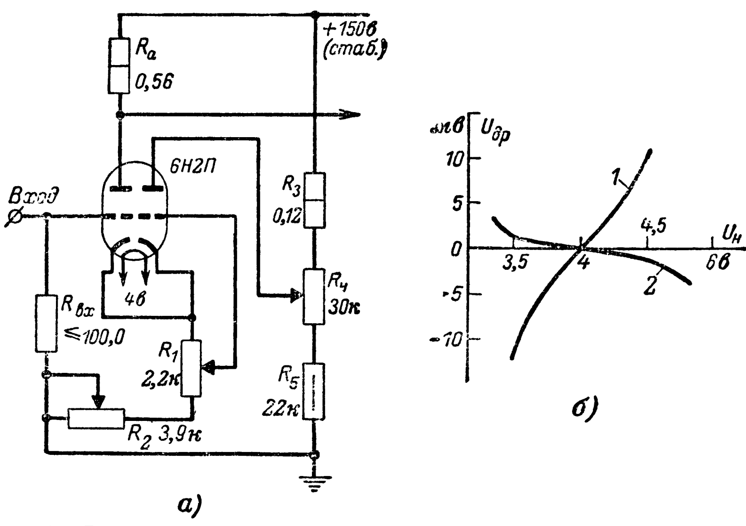


Рис. 17. Входной каскад с компенсацией температурного катодного дрейфа (*а*) и кривые компенсации дрейфа (*б*).

щее дрейф (кривая *2* на рис. 17,*б* отражает небольшую перекомпенсацию). Оптимальная величина $R_2 \approx 1/S$, коэффициент усиления рабочего триода (по напряжению)

$$K_н \approx \frac{\mu R_а}{R_а + 2\mu R_i}. \qquad (16)$$

Во входных каскадах, работающих при низком анодном напряжении, анод компенсирующего триода можно соединить непосредственно с плюсом источника питания и исключить сопротивления R_3, R_4 и R_5. Успешные результаты в этой схеме могут быть получены в сравнительно небольшом интервале напряжений накала, причем необходимо применять предварительно тренированные лампы. Достоинства схемы в значительной степени уменьшаются вследствие разброса характеристик различных экземпляров ламп и необходимости ее подстройки при смене ламп.

Дрейф, обусловленный изменением напряжений питания, может быть сильно уменьшен применением мостовых

(балансных) схем, в которых два плеча образованы триодами, а два других плеча — сопротивлениями (рис. 18). При отсутствии входного сигнала напряжение на нагрузке выхода уравновешенного лампового моста равно нулю. Входной сигнал изменяет проводимость ламп, равновесие моста нарушается и на нагрузке появляется выходной сигнал, пропорциональный входному (если лампы работают на линейном участке анодно-сеточной характеристики). С другой стороны, умеренные изменения напряжения накала и анодного напряжения вызывают почти одинаковые

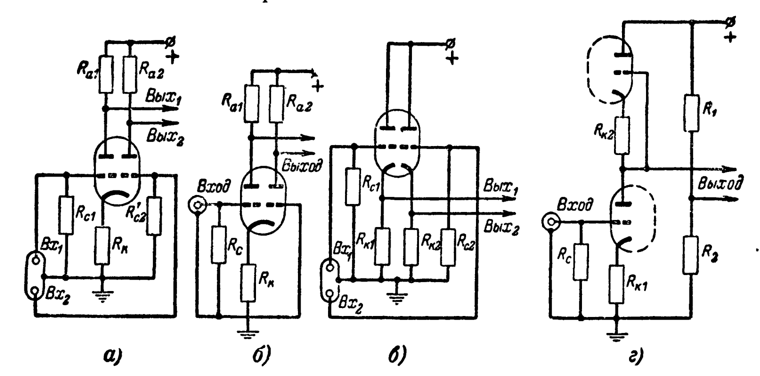


Рис. 18. Балансные схемы входного каскада.

а — параллельно-балансная с симметричным входом; *б* — то же с несимметричным входом; *в* — то же с симметричным входом и нагрузкой в цепи катодов; *г* — последовательно-балансная

изменения анодных токов в обеих лампах моста, и поэтому добавочный паразитный «сигнал дрейфа» относительно мал.

Необходимо подчеркнуть, что главное достоинство балансных схем — большая устойчивость к изменениям питающих напряжений — может быть реализовано только при условии хорошего уравновешивания. Для получения наилучших результатов следует применять лампы, предварительно тренированные и проверенные на отсутствие механического дрейфа.

При выборе величины $R_к$, $R_а$ и других сопротивлений в схемах на рис. 18 следует исходить из следующих данных. Во входном балансном каскаде триоды работают при пониженном напряжении накала (4—5 *в*) и анодном напряжении обычно не более 50 *в*. Анодный ток триода составляет 0,1—0,5 *ма*. Сопротивления $R_а$ выбираются порядка 200—500 *ком* для ламп типа 6Н2П и 50—200 *ком*

для ламп типа 6Н1П. Смещение на управляющие сетки ($I_а R_к$) берется в пределах 1—3 *в*. Сеточное сопротивление, как правило, не должно превышать 200 *Мом*, хотя с отборными экземплярами ламп его можно повысить до 2 000 *Мом*. Если входной каскад УПТ должен также усиливать сигналы с крутыми фронтами (порядка 10^{-6}—10^{-5} *сек*), то величины сопротивлений $R_а$ необходимо соответственно уменьшать. Так как при этом в целях поддержания необходимого коэффициента усиления повышают

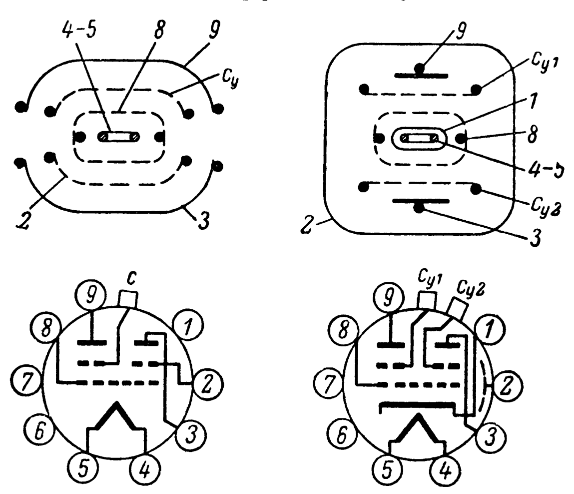


Рис. 19. Схематическое расположение электродов (в поперечном разрезе) и примеры цоколевки сдвоенных электрометрических тетродов.

напряжения питания, то увеличиваются сеточные токи и допустимая величина сеточного сопротивления снижается.

Мостовая компенсация применяется как мера снижения не только температурного дрейфа катода, но также и его временно́го дрейфа. Для этой цели сконструированы специальные сдвоенные лампы, в которых на обе системы анодов и сеток электроны поступают от общего катода (рис. 19). При производстве этих ламп принимаются меры к обеспечению равномерной эмиссии со всей поверхности катода. Лампа включается в балансную схему (рис. 20). Если вследствие старения или иных причин эмиссия катода изменяется, то в обеих половинах лампы должны происходить одинаковые изменения анодного тока и равно-

весие моста не должно нарушаться. Опыт показывает, что УПТ со сдвоенными лампами во входном каскаде имеют лишь в 2—5 раз меньший дрейф, нежели аналогичные УПТ с одиночными входными лампами. Дальнейшее снижение дрейфа лимитируется серьезными технологическими трудностями изготовления ламп, которые были бы симметричны не только геометрически, но и электрически в течение длительного времени.

Входные каскады УПТ со входными преобразователями. На сетку лампы входного каскада УПТ, работающего по одному из способов преобразования сигнала постоянного

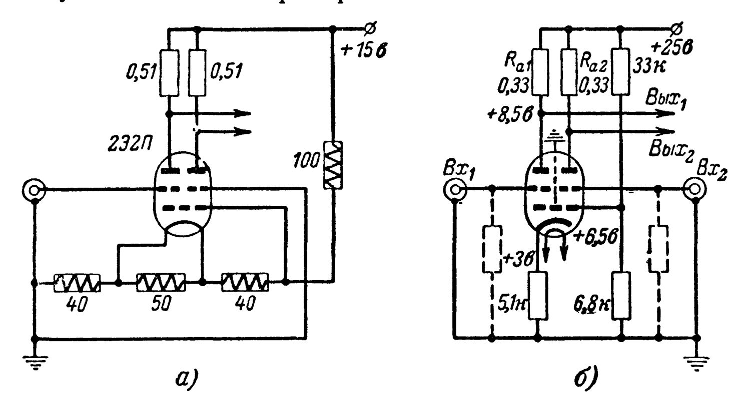


Рис. 20. Схемы входных балансных каскадов на сдвоенных электрометрических тетродах.

тока в сигнал переменного напряжения, поступают периодические колебания или импульсы, частота которых обычно не превышает 1 000 *гц*. Поэтому схема входного каскада таких УПТ почти не отличается от схемы входного каскада микрофонного усилителя, при условии, что лампа входного каскада удовлетворяет соответствующим требованиям. Существенное значение имеют сопротивления и емкости сеточной цепи входной лампы.

Схемы входной части УПТ с входным механическим прерывателем были показаны на рис. 6. В первом каскаде этих УПТ удовлетворительно работают лампы типов 6Ж8, 6Ж1П, 6Н2П и др. Лампы и монтаж входной цепи должны быть тщательно экранированы. С целью снижения шумов накал ламп следует питать постоянным током при пониженном на 20—40% напряжении, а анодное напряжение не должно превышать 50 Сеточное сопротивление $R_{вх}$

(рис. 6,*а*) должно быть значительно больше выходного сопротивления источника сигнала.

Улучшенный вариант бестрансформаторной схемы входного каскада УПТ со входным прерывателем показан на рис. 21. Благодаря разделительному конденсатору C_1 уменьшаются помехи, обусловленные флуктуациями сеточного тока лампы. Конденсатор C_2 передает на катод лампы паразитные сигналы, возникающие на верхнем контакте прерывателя, что частично компенсирует помехи.

В схемах на рис. 6,*а* и 21 сопротивление $R_к$ выбирается согласно необходимому сеточному смещению (в указанном режиме обычно 10—50 *ком*), R_1 берется в пределах 50 *ком*—1,5 *Мом*, а R_2 рассчитывается по формуле

$$R_2 \approx R_к\left(1 + \frac{2}{\mu}\right). \qquad (17)$$

При большом μ $R_2 \approx R_к$.

Затем, зная период колебания вибратора прерывателя $T_п$, задаются временем установления сигнала на сетке $T_у \leqslant 3T_п$ и вычисляют емкость конденсатора C_2:

$$C_2 = \frac{T_у}{R_1 + 2R_к\left(1 + \frac{1}{\mu}\right)}. \qquad (18)$$

Если $\mu \gg 1$ и $R_к \ll R_1$, то $C_2 \approx T_у/R_1$.

Далее определяют емкость переходного конденсатора:

$$C_1 \approx C_2\left(\frac{2R_к}{R_с} + \frac{1}{4f_0R_с}\right), \qquad (19)$$

где f_0 — частота колебаний вибратора.

Предельная чувствительность каскада по схеме на рис. 21 зависит от качества монтажа, подбора материала контактов, устойчивости и равномерности температуры входного блока. По литературным данным помехи («зона нечувствительности») могут быть уменьшены приблизительно до 10 *мкв*.

Чувствительность входного каскада с трансформаторным переходом (см. рис. 6,*б*) можно заметно повысить, если трансформатор тщательно экранировать от электрических и магнитных наводок, а его вторичную обмотку настроить на частоту f_0. Данные трансформатора для частоты 50—100 *гц*: сердечник П-образный из пермаллоя Н79М5; сечение около 0,8 *см*^{2}; первичная обмотка 2×800 витков

ПЭЛ 0,1; вторичная обмотка 20 000 витков ПЭЛ 0,05. Сопротивление $R_1 \approx 8$ *ком*.

Схема входного каскада УПТ с емкостным модулятором изображена на рис. 22. Сигнал снимается с сопротивления R_1, величина которого в зависимости от параметров датчика может быть от 10^9 до 10^{12} *ом*. При измерении малых э. д. с., поступающих от датчика с высоким входным со-

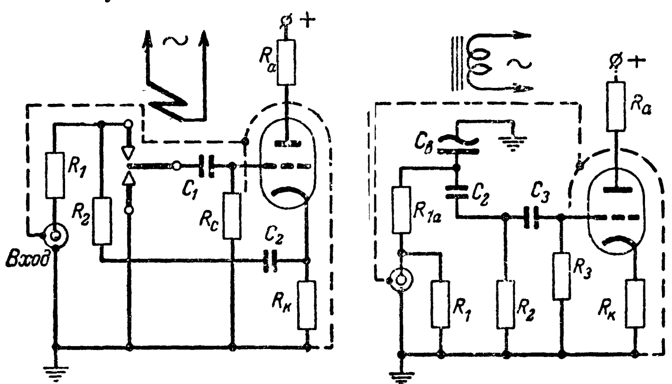


Рис. 21. Схема входного каскада УПТ с входным прерывателем.

Рис. 22. Схема входного каскада для УПТ с емкостным модулятором.

противлением, R_1 можно удалить. Через сопротивление R_{1a} сигнал поступает на неподвижную пластину виброконденсатора $C_в$, а возникающее здесь переменное напряжение поступает на сетку входной лампы через конденсаторы C_2 и C_3. Для уменьшения влияния флуктуаций сеточного тока лампы на устойчивость нуля постоянные времени C_2R_2 и C_3R_3 выбираются малыми по сравнению с $R_{1a}C_в$. С этой же целью подбирают лампу с сеточным током не более 10^{-11} *а*.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ И ОКОНЕЧНЫЕ КАСКАДЫ УПТ

11. СХЕМЫ МЕЖКАСКАДНОЙ СВЯЗИ НЕБАЛАНСНЫХ УПТ ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ

Входной каскад УПТ обычно имеет небольшое усиление по напряжению, и поэтому при слабом сигнале (менее 100 *мв*) необходимо дальнейшее усиление, которое осуще-

ствляется промежуточным усилителем напряжения (ПУН). При сигнале более 100 *мв* в измерительных усилителях обычно не пользуются ПУН, и сигнал поступает от входного каскада на соответствующий оконечный каскад. В УПТ авторегулирующих устройств ПУН применяется почти всегда в связи с необходимостью получить доста-

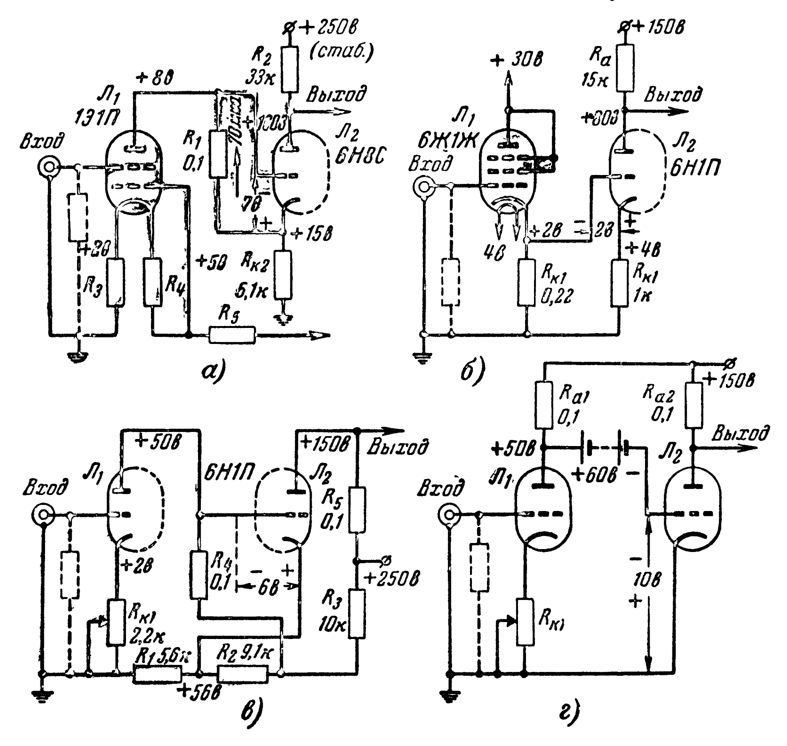


Рис. 23. Схемы перехода от входной лампы УПТ на первый каскад усилителя напряжения.

точно большое управляющее напряжение для мощного оконечного каскада.

Как уже указывалось, особенность межкаскадных переходов в УПТ прямого усиления состоит в необходимости гальванической связи без посредства конденсаторов или трансформаторов. Связь входного каскада УПТ с первым каскадом ПУН не представляет существенных затруднений, так как входной каскад работает при сравнительно низком анодном напряжении. На рис. 23,*а* приведена схе-

ма соединения электрометрической лампы $Л_1$ с первым каскадом ПУН, работающим на лампе $Л_2$.

Анодная нагрузка лампы $Л_1$ служит сеточным сопротивлением для лампы $Л_2$, причем падение напряжения на этом сопротивлении равно рабочему смещению лампы $Л_2$. Сопротивление в цепи катода лампы $Л_2$ уменьшает ее усиление за счет отрицательной обратной связи, которая здесь не может быть устранена шунтирующим конденсатором. Усиление такого каскада

$$K_{н} = -\frac{\mu R_{а}}{(1+\mu) R_{к} + R_{а} + R_{i}}. \qquad (20)$$

На рис. 23,*б* показано соединение входной лампы $Л_1$, работающей по схеме катодного повторителя, с первым каскадом ПУН (лампа $Л_2$). Смещение на сетку лампы $Л_2$ здесь получается за счет разности напряжений на катодах ламп.

Заметим, что режим ламп первых каскадов ПУН выбирается по их анодно-сеточным характеристикам с таким расчетом, чтобы анодный ток не превышал $^1/_3$ номинального, а рассеяние мощности на аноде было не более 0,05 допустимого. Такой заниженный режим применяется с целью уменьшения механического дрейфа, который может происходить вследствие нагрева электродов.

На рис. 23,*в* входная лампа УПТ ($Л_1$) работает с анодной нагрузкой, на которой падение напряжения намного превышает нормальное значение сеточного смещения лампы $Л_2$. Для компенсации избыточного смещения за счет падения напряжения на сопротивлении $R_{к2}$, как это сделано в схеме рис. 23,*а*, потребовалось бы большое сопротивление, что привело бы к снижению усиления каскада с лампой $Л_2$. Поэтому применен относительно низкоомный делитель $R_1R_2R_3$, с которого снимаются необходимые напряжения.

Эта схема весьма чувствительна к изменению напряжений питания и качеству сопротивлений. Поэтому в подобных усилителях обычно применяются лампы с напряжением накала 12,6 и 30 *в*, причем подогреватели соединяются последовательно и включаются в цепь делителя. В целях обеспечения устойчивой работы усилителя следует применять предварительно тренированные лампы и высокостабильные сопротивления. Монтаж не должен быть тесным во избежание излишнего нагрева.

Для питания следующих каскадов ПУН при такой схеме связи требуется добавление напряжения по 100—150 *в* на каждый каскад. Вместе с необходимостью применения довольно громоздких монтажных деталей это является серьезным недостатком. Кроме того, при числе каскадов более двух эта схема очень сложна в наладке.

Схема на рис. 23,*г* отличается меньшей сложностью, однако требует применения малогабаритной батареи, напряжение которой должно быть устойчиво в течение длительного времени, а также при изменениях температуры. Производство батарей столь высокого качества связано с затратой дорогостоящих и дефицитных материалов. Это является одной из причин редкого применения данной схемы.

Схемы, показанные на рис. 23,*в* и *г*, могут применяться также и для связи между другими каскадами ПУН. Возможно также применение переходных цепей, в которых за счет некоторой потери усиления достигается улучшение устойчивости.

На рис. 24,*а* показаны два каскада ПУН, в которых применена переходная цепь с компенсацией анодного напряжения предыдущей лампы при помощи сравнительно большого напряжения смещения, которое подается через сопротивление R_2. Поскольку сетке лампы $Л_2$ сообщается не весь сигнал, а часть его, равная $R_2/(R_1+R_2)$, то потеря усиления тем меньше, чем меньше отношение R_1/R_2. Однако при этом должно соблюдаться условие $R_1+R_2 \gg R_{a1}$, так как иначе анодная нагрузка лампы $Л_1$ будет сильно шунтирована и усиление каскада уменьшено. Величина сопротивления R_2 ограничивается практическими соображениями о максимально допустимом напряжении источника смещения E_c. Обычно $R_1 \approx 3R_a$, а $E_c \approx E_a$.

На основании этих данных рассчитывается величина сопротивления R_2:

$$R_2 = \frac{R_1(E_c - U_{c2})}{U_{a1} + U_{c2}}. \qquad (21)$$

Для корректировки режима ламп в связи с различием их индивидуальных характеристик служит сопротивление $R_{к1}$.

Для уменьшения потери усиления в переходной цепи целесообразно произвести следующее: либо заменить сопротивление R_1 нелинейным элементом, падение на котором

достаточно постоянно, т. е. стабилизатором напряжения, либо сопротивление R_2 заменить стабилизатором тока. В том и другом случае разность напряжений между анодом лампы $Л_1$ и сеткой лампы $Л_2$ не будет изменяться с из-

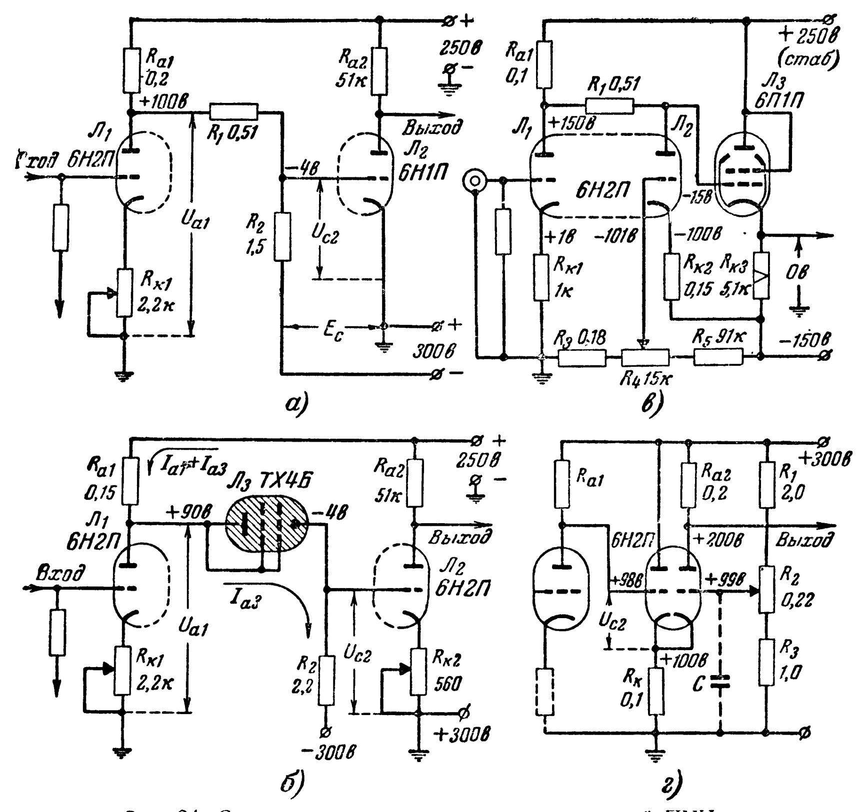


Рис. 24. Схемы межкаскадных переходных цепей ПУН.

а — с анодно-сеточным делителем; *б* — со стабилитроном вместо сопротивления R_1; *в* — со стабилизатором тока вместо сопротивления R_2; *г* — с катодной связью.

менением величины U_{a1}, и, следовательно, на сетку лампы $Л_2$ будет передаваться почти весь сигнал с анода лампы $Л_1$.

Схема, соответствующая первому варианту, показана на рис. 24,*б*. Здесь сопротивление R_1 (рис. 24,*а*) заменено лампой тлеющего разряда с устойчивым напряжением горения $U_г$, например тиратроном типа ТХ4Б с подключенными на анод сетками (диодный режим). Величины со-

противлений R_{a1} и $R_{к1}$ устанавливаются такими, чтобы анодное напряжение лампы $Л_1$ составляло $U_{a1} = U_г + U_{c2}$. Величина R_2 выбирается из следующего расчета:

$$R_2 = (U_{c2} + E_c)/I_{a3}.$$

Для тиратронов ТХ3Б и ТХ4Б в диодном режиме рабочий ток находится в пределах 0,1—0,5 *ма*.

Устойчивость усилителя с такой переходной цепью в большой мере зависит от качества лампы $Л_3$, в особенности от временно́й стабильности напряжения $U_г$ и отсутствия его флуктуаций. Предварительная 50—100-часовая тренировка и отбор ламп целесообра́зны и в данном случае. Переходные цепи подобного типа используют обычно между последним каскадом ПУН и усилителем мощности, так как на этом переходе напряжение сигнала уже достаточно велико и небольшие флуктуации напряжения $U_г$ не вносят существенной погрешности.

Второму варианту соответствует схема на рис. 24,*в*. Роль стабилизатора тока выполняет лампа $Л_2$, работающая с сильной обратной связью по току, обусловленной большим сопротивлением в катодной цепи ($R_{к2} \gg R_i$). При изменении величины U_{a1} ток через переходное сопротивление R_1 остается практически неизменным. Следовательно, не меняется и падение напряжения на R_1, благодаря чему сигнал ΔU_{a1} передается на сетку лампы $Л_2$ с минимальным ослаблением.

В УПТ, используемых в электронных стабилизаторах, часто применяется сдвоенный каскад, представляющий собой объединение катодного повторителя и каскада с заземленной (по сигналу) сеткой. Схема такого каскада показана на рис. 24,*г*. Усиление каскада

$$K_н \approx \frac{\mu}{1 + \frac{2R_a}{R_i} + \frac{R_i (R_a + R_i)}{R_a R_к (1 + \mu)}}. \quad (22)$$

Благодаря катодному повторителю каскад имеет большое входное сопротивление и малую входную емкость. В случае, если сигнал имеет крутой фронт, можно включить конденсатор C емкостью около 0,01 *мкф*.

В зависимости от требований, предъявляемых к УПТ как к части комплексного устройства, а также от условий

питания, схемы каскадов ПУН и их переходные цепи могут широко видоизменяться. На рис. 25 представлены варианты трехкаскадных ПУН, рассчитанных на питание от одного источника анодного напряжения с заземленным минусом.

Усилитель по схеме на рис. 25,*а* работает в микротоковом режиме. Его коэффициент усиления по напряжению — порядка 10^5. Максимальный выходной сигнал — около 20 *в*.

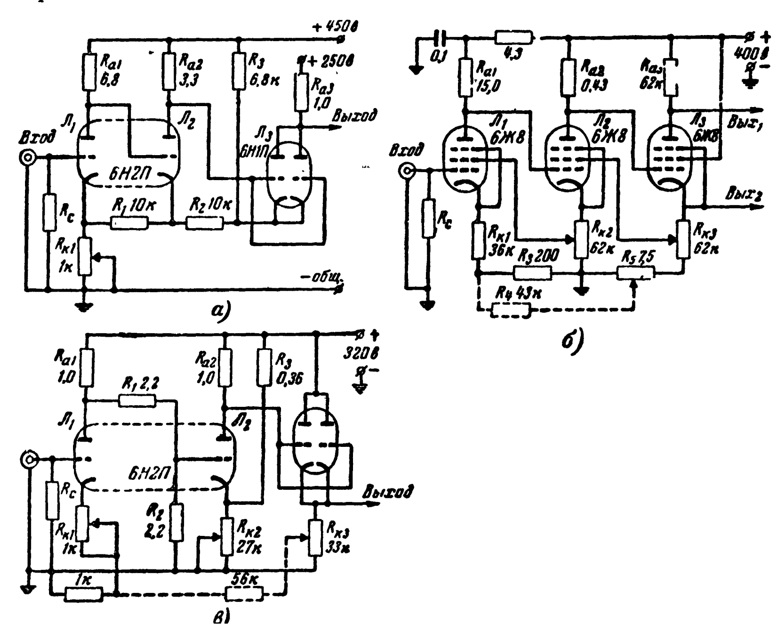


Рис. 25. Варианты схем связи между каскадами ПУН. Пунктиром показаны цепи отрицательной обратной связи.

Установка режима в основном производится при помощи сопротивления $R_{к1}$, но иногда может потребоваться подбор сопротивлений $R_{а1}$ и $R_{а2}$.

Усилитель, схема которого показана на рис. 25,*б*, в отличие от ранее описанных выполнен на пентодах. В нем предусмотрена отрицательная обратная связь, которая служит для стабилизации усиления и улучшения линейности. Лампа $Л_1$ работает в микротоковом режиме. Ее режим устанавливается подбором напряжения на экранирующей сетке, снимаемого с сопротивления $R_{к2}$. На катодное со-

противление $R_{к1}$ через сопротивления R_3 и R_4 подается напряжение обратной связи с катода лампы $Л_3$. Установка необходимого усиления производится при помощи сопротивления R_5. Выходной сигнал можно снимать как с анода лампы $Л_3$, так и с ее катода.

На рис. 25,*в* приведена схема смешанной межкаскадной связи, которая содержит элементы схем, приведенных на рис. 23,*а* и *в* и 24,*а*. Вместо отрицательного компенсирующего напряжения, подаваемого на сетку лампы $Л_2$, здесь подается положительное напряжение на катод этой лампы через сопротивление R_3, причем ток делителя R_3 $R_{к2}$ примерно в 5 раз больше анодного тока лампы. Благодаря этому происходит частичная стабилизация начального смещения, и обратная связь, обусловленная сопротивлением $R_{к2}$, в меньшей мере снижает усиление каскада.

Описанные здесь каскады ПУН относятся к несимметричному (небалансному) виду. Как уже было отмечено, для получения удовлетворительной устойчивости таких усилителей необходимо применять высококачественные детали, тренированные лампы и такие источники питания, суммарная нестабильность которых не превышает 0,1%.

Значительно менее жесткие требования к стабильности питания предъявляют усилители, все каскады которых собраны по балансным схемам. Такие «сквозные балансные» УПТ допускают колебания питающих напряжений до $\pm 1\%$, что намного упрощает блоки питания.

12. БАЛАНСНЫЕ СХЕМЫ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Принцип действия входного балансного каскада описан в § 10. Его схема приведена на рис. 20.

Балансный каскад усиления напряжения или мощности в настоящее время является одним из наиболее надежных в эксплуатации схемных узлов УПТ. В УПТ, работающих в авторегулирующих системах, применяется довольно много вариантов балансных каскадов; из них мы рассмотрим схемы и основные расчетные формулы наиболее употребительных.

Балансные каскады разделяются на два основных вида: параллельные, в которых лампы образуют оба нижних или оба верхних плеча моста (схема на рис. 26,*а*), и последовательные, в которых лампы образуют одну ветвь моста (схема на рис. 26,*г*). Общие достоинства

балансных каскадов по сравнению с небалансными состоят в малой зависимости усиления от питающих напряжений, меньшем температурном дрейфе и большом участке линейной зависимости выходного сигнала от входного; при этом

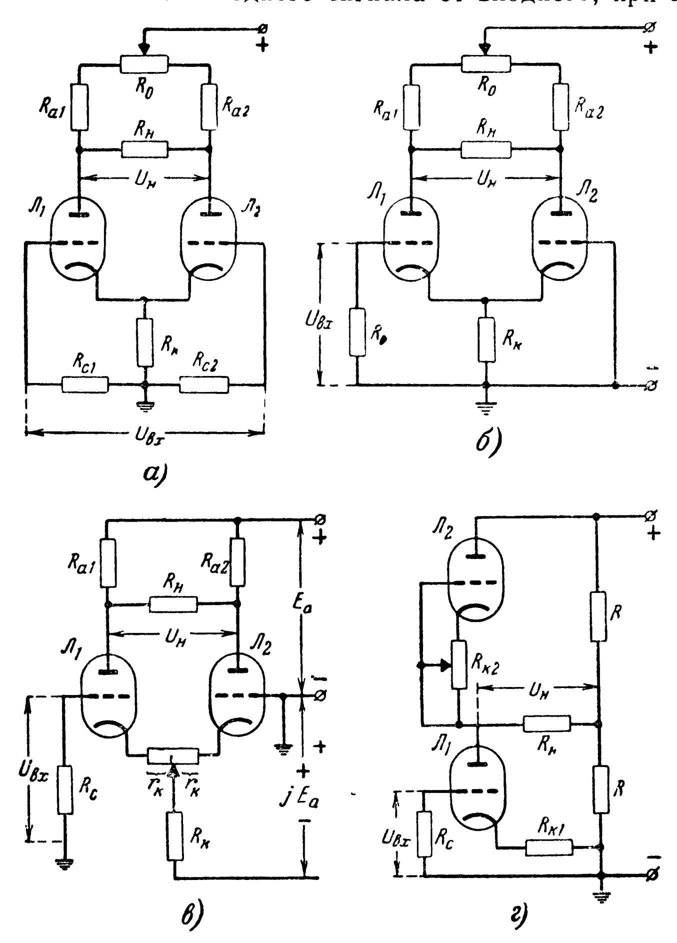


Рис. 26. Схемы балансных каскадов.

потребляемый балансным каскадом анодный ток мало зависит от напряжения сигнала. Последовательные балансные каскады отличаются от параллельных несколько меньшим временным дрейфом благодаря тому, что их усиление зависит главным образом от μ ламп, т. е. от параметра,

мало изменяющегося во времени. Однако последовательные балансные каскады имеют высокое выходное сопротивление и отдают малую мощность.

На рис. 26,*а* и *б* приведены схемы параллельных балансных каскадов с симметричным и несимметричным входами. В этих каскадах $R_а$ берется обычно от $R_а \approx R_i$ до $R_а \geqslant 3R_i$ (в режиме микротоков $R_а \approx 100R_i$). Сопротивление нагрузки между анодами обычно берется от $R_н = R_i$ до $R_н = 2R_а$, но при использовании каскада в качестве усилителя напряжения оно может быть много больше.

Коэффициент усиления по напряжению

$$K_н = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_а} + \frac{2R_i}{R_н}}. \qquad (23)$$

Напряжение на нагрузке

$$U_н = U_{вых} = K_н U_{вх} = R_н I_н. \qquad (24)$$

Крутизна характеристики

$$S_у = \frac{I_{вых}}{U_{вх}} = \frac{\mu R_а}{2R_а R_i + (R_а + R_i)}. \qquad (25)$$

На рис. 26,*в* приведена схема параллельного балансного каскада с анодным питанием от двух источников, благодаря чему смещение на сетках ламп меньше, нежели падение напряжения на катодном сопротивлении. Сопротивления $r_к$ (плечи потенциометра) служат для балансировки. Выходное сопротивление каскада по этой схеме

$$z = R_а + R_i + (1 + \mu)(r_к + R_к). \qquad (26)$$

Оптимальная нагрузка $R_н$ может быть выбрана в следующих пределах:

$$R_н = \frac{2R_а (z - R_а)}{z}; \qquad (27)$$

$$R_н = \frac{R_а^2}{(1 + \mu) R_к}. \qquad (28)$$

Крутизна характеристики и ток в нагрузке

$$S_у = \frac{\mu R_а}{(2R_а + R_н) z - 2R_а^2}; \quad I_н = S_у U_{вх}. \qquad (29)$$

Напряжение на нагрузке и коэффициент усиления по напряжению вычисляются аналогично формулам (23) и (24).

На рис. 26,*г* приведена схема последовательного балансного каскада. Его выходное сопротивление (при $R_{к1}= R_{к2}=R_к$)

$$z=R_i+(1+\mu)R_к. \tag{30}$$

Оптимальная нагрузка

$$R_н\approx 0{,}5(R+z). \tag{31}$$

Крутизна характеристики

$$S_у=\frac{I_н}{U_{вх}}=\frac{\mu}{R+z+2R_н}. \tag{32}$$

Напряжение на нагрузке, ток в ней и коэффициент усиления по напряжению вычисляются аналогично формулам (23) и (24).

Балансные каскады широко применяются и как оконечные в УПТ прямого усиления. Соответствующие схемы и расчетные формулы аналогичны вышеприведенным. Ниже приводятся примеры схем двухкаскадных балансных ПУН.

В схеме балансного усилителя напряжения, которая показана на рис. 27,*а*, каждый каскад представляет собой ламповый мост, причем одно плечо балансного усилителя почти не отличается по схеме от небалансного (см. рис. 24,*в*). Устойчивость балансного каскада достигается благодаря тому, что изменение напряжений питания воздействует практически в равной мере на оба плеча. Поэтому, хотя при изменении напряжения питания «абсолютные» (относительно минуса) значения анодных напряжений ламп и изменяются, разность анодных напряжений в одном каскаде, являющаяся полезным сигналом, сохраняется существенно постоянной.

Схема на рис. 27,*б* представляет вариант балансного ПУН, отличающийся тем, что первый каскад работает в микротоковом режиме. Здесь аноды ламп первого каскада соединены непосредственно с сетками второго, а необходимое смещение на сетках лампы $Л_2$ получается за счет сопротивления $R_{к2}$. Балансировка производится при помощи потенциометра $R_{к0}$. Для стабилизации питания анодных цепей в подобных ПУН достаточно стабилитрона типа СГ1П или СГ4С.

В изображенном на рис. 27 виде схемы предназначены для симметричного относительно «земли» сигнала, однако можно подавать и несимметричный сигнал на сетку одного из триодов $Л_1$ и $Л_2$. Стабильность усилителя при этом практически почти не ухудшается, так как первый каскад бли-

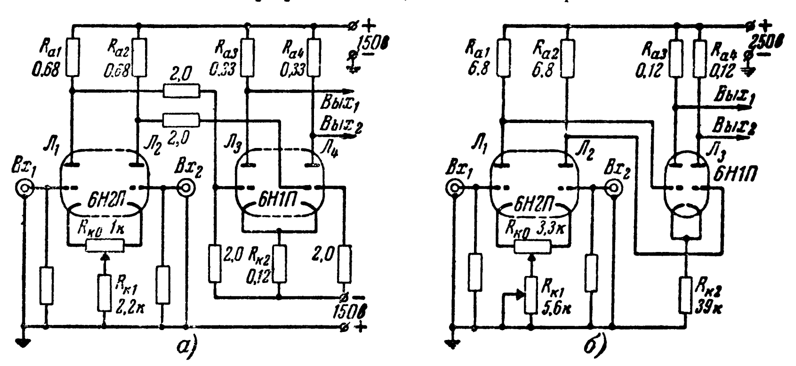


Рис. 27. Схемы балансных двухкаскадных ПУН.

зок по схеме к парафазному и второй каскад получает симметрированный сигнал.

Аналогичным образом составляются балансные усилители на базе схем, приведенных на рис. 24,*б* и *в*. В случае несимметричного сигнала рекомендуется в первом каскаде балансного ПУН применять большое катодное сопротивление для симметрирования выходного сигнала каскада.

13. КОМПЕНСАЦИЯ ДРЕЙФА И СИММЕТРИРОВАНИЕ БАЛАНСНЫХ КАСКАДОВ

С целью сокращения габаритов в балансных ПУН применяют большей частью двойные триоды. Однако параметры двух триодов, заключенных в общий баллон, почти всегда неодинаковы. Простейший способ балансировки применен в схемах на рис. 27; выравнивание достигается также в схемах на рис. 26,*в* и *г* путем подгонки сопротивлений в катодных цепях. Для регулярной (операторской) установки нуля этими сопротивлениями не пользуются; их монтируют внутри блоков усилителей как подстроечные элементы, необходимые обычно лишь при смене ламп.

Балансные каскады, работающие на отдельных лампах, лучше симметрировать регулировкой напряжения накала, как показано на рис. 28,*а*. Эта схема применима и для

двойного триода типа 12Н4П (рис. 28,*б*), параметры которого и в других отношениях вполне удовлетворяют условиям работы в балансных каскадах УПТ. При использовании этих схем другие элементы симметрирования (кроме общего регулятора нуля) устраняются; перемещением движка потенциометра производится выравнивание зависимости анодных токов триодов от изменения напряжения

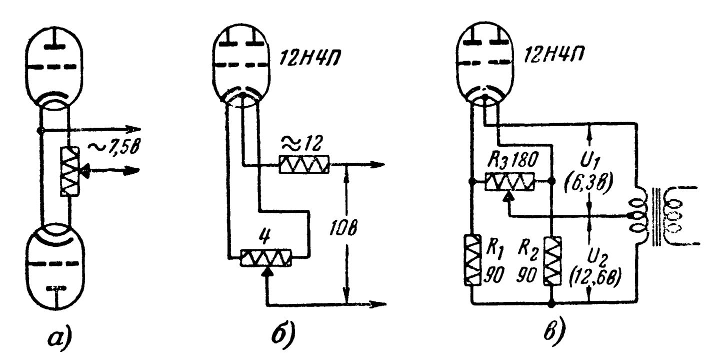


Рис. 28. Схемы симметрирования балансного каскада по напряжению накала.

накала. Выравнивание можно контролировать по анодным напряжениям обоих триодов.

Уменьшение той части катодного дрейфа, которая обусловлена изменением тока накала вследствие изменения сопротивления подогревателя, может быть осуществлено при помощи ограничительных сопротивлений R_1 и R_2, в несколько раз превышающих сопротивление подогревателя (рис. 28,*в*). Выравнивание производится перемещением движка сопротивления R_3.

Данные сопротивлений в схеме на рис. 28,*в* указаны для лампы типа 12Н4П. В этой схеме следует соблюдать следующие соотношения (при $U_1 = U_н$, где $U_н$ — номинальное напряжение накала):

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_1}{r_1} = \frac{R_2}{r_2}; \quad (33)$$

$$\frac{R_1 R_3}{2R_1 + R_3} = r, \quad (34)$$

где $r_1 \approx r_2 = r$ — рабочее сопротивление подогревателей.

Если $U_2 = 2U_1$, то $R_3 = 2R_1 = 2R_2 \approx 4r$.

Температурный катодный дрейф в каскадах, уравновешенных по схемам на рис. 28, может быть в несколько раз ниже, чем в каскадах с анодной балансировкой. Недостаток этих схем состоит в значительной затрате времени на симметрирование каскадов вследствие тепловой инерции подогревных катодов.

14. ВЫХОДНОЙ КАСКАД УПТ ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ

Оконечный каскад УПТ вырабатывает сигнал для измерительного (регистрирующего) устройства или для исполнительного механизма. Основные параметры оконечного каскада: 1) крутизна характеристики S и максимально допустимый ток нагрузки $I_{\text{н.макс}}$ (эти параметры связаны с диапазоном линейного усиления лампы или с максимально допустимой величиной ее входного сигнала); 2) выходное сопротивление каскада z; 3) оптимальная нагрузка $R_{\text{н}}$; 4) начальное напряжение E_0 на выходных зажимах по отношению к общему проводу («земле») — так называемый уровень нуля.

Если один из полюсов нагрузки заземлен, то оконечный каскад УПТ должен иметь несимметричный выход. В измерительных УПТ, нагрузкой которых служит показывающий прибор, чаще применяются оконечные каскады с симметричным. выходом, оба полюса которого не заземлены.

Исходными условиями для выбора ламп и схемы являются свойства внешней нагрузки оконечного каскада. Так, например, в измерительных установках ток нагрузки $I_{\text{н}}$ обычно бывает менее 25 *ма* (чаще в пределах 0,5—5 *ма*), а сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ — в пределах от 100 *ом* до 10 *ком*. В авторегулирующих устройствах нагрузка оконечного каскада может быть значительно разнообразнее. Уровень нуля большей части измерительных усилителей (кроме компактных переносных типов) должен быть возможно ближе к «земле». Это условие весьма желательно выполнять и в УПТ, предназначенных для авторегулирующих систем.

Наибольшее применение в оконечных каскадах УПТ прямого усиления получили балансные схемы с так называемым «преобразованным к нулю» начальным выходным напряжением. С подобным преобразованием читатель уже знаком по схемам переходных цепей ПУН, приведенным на рис. 24.

Для преобразования выходного напряжения к нулю элементы переходной цепи рассчитываются так, что при отсутствии сигнала сетки ламп оконечного каскада имеют отрицательное напряжение относительно катодов, а напряжение катодов (или анода) относительно «земли» равно нулю. Пример распределения напряжений в такой схеме показан на рис. 29,*а* (элементы балансировки на схеме не приведены). Потеря усиления предыдущего каскада на сопротивлениях перехода составляет около 40%. Как и в

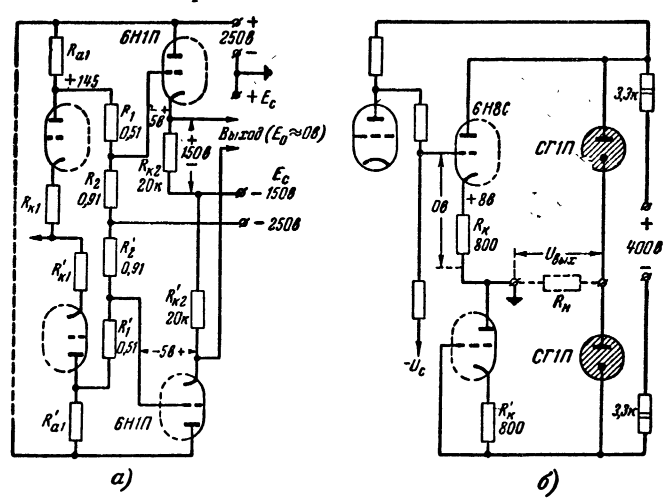


Рис. 29. Схема преобразования уровня постоянного напряжения при переходе на оконечный каскад (*а*) и схема последовательно-балансного каскада (*б*).

межкаскадных переходах ПУН, эта потеря может быть уменьшена применением в каждом плече схем, показанных на рис. 24,*б* или *в*.

В схеме на рис. 29,*а* нагрузка включается в диагональ моста между катодами оконечных триодов; выход и вход являются симметричными. Для несимметричного сигнала может быть применен каскад по последовательной балансной схеме, приведенной на рис. 29,*б*. В этой схеме коэффициент усиления напряжения $K_н \approx 0{,}5\,\mu$, а крутизну характеристики $S_у$ и ток нагрузки можно определить по следующим формулам:

$$S_у \approx \frac{\mu}{2R_н}; \quad I_{вых} \approx \frac{\mu U_{вх}}{2R_н}. \qquad (35)$$

При хорошо подобранных и тренированных лампах каскад по схеме на рис. 29,*а* имеет дрейф не более 10 *мв*, а каскад по схеме на рис. 29,*б* — около 5 *мв* за 8 *ч* работы. Эти величины следует учитывать при определении напряжения минимального входного сигнала: сигнал должен превышать дрейф не менее чем в 50 раз (в измерительных усилителях — в 100—500 раз).

При большом напряжении сигнала, когда дрейф оконечного каскада не имеет существенного значения, но ко-

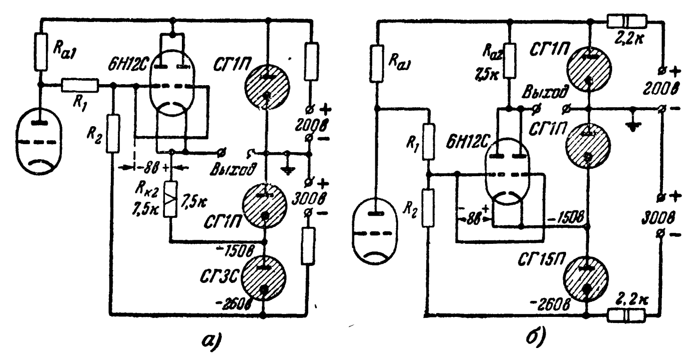


Рис. 30. Несимметричные мостовые схемы оконечного каскада.

гда требуется большой ток сигнала на выходе, применяются схемы, показанные на рис. 30. Большая мощность выходного сигнала здесь достигается благодаря малому внутреннему сопротивлению стабилитронов, образующих вторую ветвь моста. Подача входного сигнала может производиться не только через сопротивления R_1 и R_2, но и при помощи других переходных цепей, например показанных на рис. 24,*в* и *г*.

Оконечные каскады измерительных УПТ обычно собираются по схемам, приведенным на рис. 26,*а* или 29. В компактных переносных приборах часто применяют и схемы, показанные на рис. 30, но стабилитроны во второй ветви моста в этом случае заменяют сопротивлениями.

15. ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ И ОКОНЕЧНЫЕ КАСКАДЫ УПТ С ВХОДНЫМИ ПРЕРЫВАТЕЛЯМИ И МОДУЛЯТОРАМИ

В простейших и сравнительно малочувствительных (порядка 10—100 *мв*) УПТ с входными прерывателями и модуляторами применяются в качестве ПУН обычные узко-

полосные усилители звуковой частоты с RC-переходами, середина полосы пропускания которых соответствует частоте модуляции. Однако в высокочувствительных УПТ этого вида необходимо устранение паразитных сигналов (помех), обусловленных контактными потенциалами прерывателей и модуляторов, а также «наводками».

Бóльшая часть методов устранения помех основана на том, что полезный и паразитный сигналы отличаются по частоте, фазе или по другим амплитудно-временны́м параметрам (рис. 31; на рис. 31,*б* заштрихована область полезного сигнала). Фазочувствительный демодулятор, включаемый между ПУН и оконечным каскадом (см. рис. 6, 8

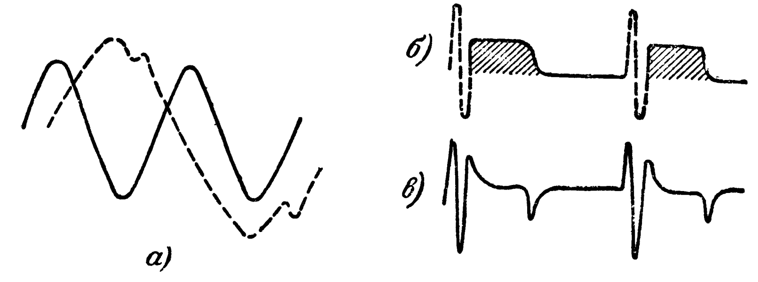


Рис. 31. Эпюры осциллограмм сигнала и помехи.
а — в УПТ с входным виброконденсатором; *б* — в УПТ с входным прерывателем (сплошные линии — сигнал, пунктирные — помеха), *в* — искажения сигнала, показанного на рис. *б*, при плохой фазовой характеристике ПУН.

и 9), позволяет устранять помеху даже тогда, когда ее амплитуда значительно больше амплитуды сигнала. В частности, при показанном на рис. 31,*б* сигнале это достигается тем, что демодулятор или синхронный детектор «открываются» лишь после окончания паразитного импульса.

Для выполнения указанных требований особенно важны хорошая фазовая характеристика ПУН на частотах, близких к частоте модуляции (прерывания), и отсутствие в ПУН длительного переходного процесса при паразитных импульсах, амплитуда которых превышает полезный сигнал («неперегружаемость»). Кроме того, ПУН должен иметь прямолинейную амплитудную характеристику и устойчивое усиление.

В УПТ с преобразованием, как правило, нет резкого разделения функций между входным каскадом и ПУН: первый каскад ПУН служит обычно и входным каскадом УПТ, на который поступает сигнал от преобразователя.

Необходимая фазовая характеристика, линейность и устойчивость ПУН достигаются при помощи отрицательной обратной связи. Нередко прибегают (особенно в первых каскадах) к гальванической междукаскадной связи, обеспечивающей неперегружаемость и лучшую фазовую характеристику ПУН.

С целью уменьшения помех питание накала ламп первых каскадов высокочувствительных УПТ производят постоянным током, получаемым от компактного выпрямителя на плоскостных германиевых диодах со сглаживающим фильтром на низковольтных малогабаритных электролитических конденсаторах емкостью 100—500 *мкф*. Если по условиям эксплуатации датчик сигналов, например ионизационная камера, находится на большом расстоянии от основного блока УПТ, то применяют выносную «головку», в которой, кроме преобразователя, монтируют входной каскад и катодный повторитель.

С последнего каскада ПУН сигнал переменного напряжения поступает на демодулятор, который преобразует его в напряжение постоянного тока, причем полярность демодулированного сигнала соответствует полярности входного.

Простейшие демодуляторы представляют собой прерыватели, механически связанные со входными прерывателями или синхронизованные с ними. Широко применяются также электронные системы (фазочувствительные выпрямители, лампы с двойным управлением и пр.). Схемы ряда ПУН и демодуляторов приводятся в гл. 5.

Оконечный каскад УПТ с входным модулятором или прерывателем обычно служит сравнительно мощным усилителем тока. Его схема и технические данные выбираются в соответствии с нагрузкой. Поскольку на вход оконечного каскада поступает достаточно большой сигнал (обычно порядка 10 *в* или более), дрейф здесь не имеет практического значения и можно применять схемы, приведенные на рис. 30. Нередко в целях сокращения числа ламп оконечный каскад исключают, а последний каскад ПУН рассчитывают так, чтобы сигнал на выходе демодулятора обладал полной заданной мощностью.

16. ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ В УПТ

С целью стабилизации усиления, улучшения линейности и некоторых других параметров в усилителях, как известно, применяется отрицательная обратная связь. В УПТ она отличается тем, что осуществляется «по постоянному

току», т. е. при помощи одних только активных сопротивлений, соединяющих выход со входом, причем полярность сигнала обратной связи противоположна полярности входного сигнала. На рис. 32 показаны принципиальные схемы отрицательной обратной связи. В схеме на рис. 32,*а* часть напряжения, снимаемого с делителя на выходе УПТ, подается на его вход последовательно со входным сигналом. Как известно, результирующее усиление напряжения сигнала при отрицательной обратной связи

$$K_{о.с}=\frac{K}{1+\beta K}, \quad (36)$$

где K — коэффициент усиления напряжения без обратной связи.

Коэффициент обратной связи в схеме, приведенной на рис. 32,*а*:

$$\beta=\frac{R_2}{R_1+R_2}. \quad (37)$$

Напряжение обратной связи $U_{о.с}=\beta U_{вых}$, а напряжение сетка—катод входной лампы $U_с=U_{вх}-U_{о.с}$.

Если один из полюсов датчика заземлен, то обратная связь осуществляется по принципиальной схеме, показанной на рис. 32,*б*.

Заметим, что в обеих схемах (рис. 32,*а* и *б*) необходимо, чтобы при отсутствии сигнала на входе напряжение на выходе равнялось нулю относительно земли (уровень нуля $E_0=0$), так как иначе сетка входной лампы получит дополнительное смещение, которое может нарушить режим усилителя. Переведя движок сопротивления R_1R_2 в верхнее положение, т. е. установив $R_1=0$, получим $\beta=1$. Если K достаточно велик (например, $K>100$), то $K_{о.с}\approx 1$ (это случай „100-процентной" отрицательной обратной связи).

Напомним, что в каскаде по схеме катодного повторителя отрицательная обратная связь близка к 100-процентной. При этом УПТ превращается в своеобразный трансформатор сопротивления: он имеет большое входное и очень малое выходное сопротивление (см. ниже), а $U_{вых}\approx U_{вх}$.

При необходимости стабилизировать усиление тока применяют обратную связь по схеме, приведенной на рис. 32,*в* (для датчика с заземленным полюсом) или на рис. 32,*г* (для нагрузки с заземленным полюсом). Здесь напряжение обратной связи снимается с сопротивления

$R_{о.с}$, включенного последовательно с нагрузкой $R_н$. Следовательно, $U_{о\,с} = I_н R_{о.с}$.

Применяются также схемы комбинированной отрицательной обратной связи, где $U_{о.с}$ складывается из двух

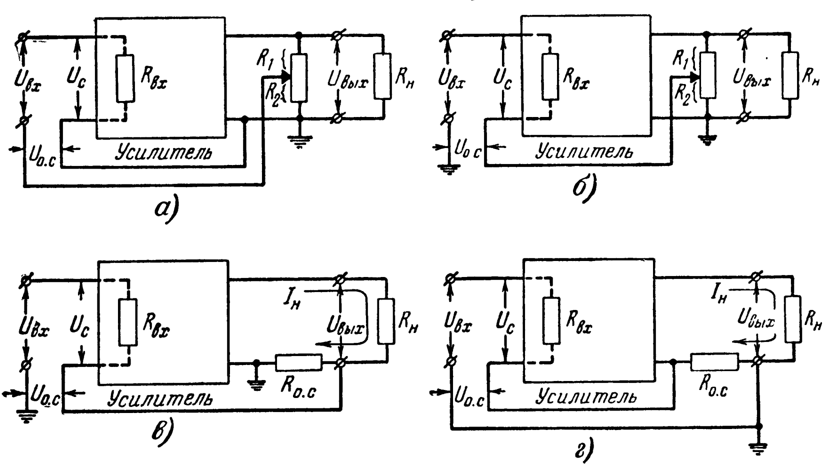


Рис. 32. Схемы обратной связи.
Полярность напряжения $U_{вых}$ такова, что полярности $U_{о.с}$ и $U_{вх}$ противоположны.

напряжений, соответственно пропорциональных току $I_н$ и напряжению $U_{вых}$.

Выражение (36) показывает, что результирующее усиление УПТ снижается за счет отрицательной обратной связи в $1 + \beta K$ раз. Во столько же раз снижается и относительная нестабильность усиления, обусловленная старением ламп, деталей и другими факторами,

$$\frac{\Delta K_{о.с}}{K_{о.с}} = \frac{\Delta K}{K} \cdot \frac{1}{1 + \beta K}. \qquad (38)$$

При сильной отрицательной обратной связи и большой величине K рабочее усиление УПТ практически не изменяется при смене ламп, изменении питающих напряжений на $\pm$ 5% и тепловом изменении сопротивлений (в результате рабочего прогрева) в цепях усилителя.

Стабилизацию усиления не следует смешивать со стабилизацией нуля: отрицательная обратная связь, напряже-

ние которой вводится между входом усилителя и датчиком сигнала или параллельно датчику сигнала, не может компенсировать дрейфа, источник которого находится внутри лампы (он как бы включен последовательно с промежутком сетка — катод). Имеющиеся в литературе сведения о снижении дрейфа при помощи отрицательной обратной связи надо, по-видимому, понимать как уменьшение сползания показаний приборов, обусловленное уменьшением усиления, а не как уменьшение приведенного ко входу дрейфа. Предел чувствительности УПТ, определяемый дрейфом, непосредственно не улучшается введением отрицательной обратной связи (т. е. отношение $U_{сигн}/U_{др}$ для УПТ с одним и тем же датчиком не увеличивается).

В УПТ с большими сопротивлениями $R_{вх}$ и большой емкостью $C_{вх}$ на входе наблюдается запаздывание входного напряжения по отношению к току датчика, обусловленное постоянной времени $\tau_{вх} = R_{вх}C_{вх}$. Анализ и опыт показывают, что отрицательная обратная связь уменьшает постоянную времени в $1+\beta K$ раз, а в УПТ со 100-процентной обратной связью — примерно в K раз. Благодаря этому как бы уменьшается входная емкость УПТ, что позволяет пользоваться большими значениями $R_{вх}$, т. е. эффективно повышать предел чувствительности УПТ. С другой стороны, увеличение быстродействия также является ценным результатом для ряда важных применений.

При рассмотрении входного каскада по схеме катодного повторителя (см. рис. 16) уже указывалось, что обратная связь существенно повышает входное сопротивление лампы этого каскада. То же имеет место и в многокаскадных УПТ, в которых напряжение отрицательной обратной связи подается в катодную цепь входной лампы.

В правильно сконструированном УПТ обратную связь возможно изменять в очень широких пределах, не ухудшая параметров УПТ. Это позволяет регулировать усиление УПТ с высокоомным входом при помощи сравнительно низкоомных переменных сопротивлений, включенных на выходе УПТ.

Для наглядности рассмотрим числовой пример. Пусть усиление $K = 10^4$. Тогда при $\beta = 10^{-2}$ получим рабочее усиление $K_{о.с} \approx 100$, нестабильность которого составит около 1% от нестабильности без обратной связи. При 100-про-

центной обратной связи $K = 1$. Пусть выходное сопротивление усилителя (рис. 32,*а*) составляет 10 *ком*. Не ухудшая условий нагрузки, можно включить на выходе потенциометр $R_1=99$ *ком* с ограничительным сопротивлением $R_2=1$ *ком* и регулировать усиление от 1 до 100. Можно также заменить R_1 калиброванным ступенчатым делителем. В этом случае данный УПТ может служить измерительным прибором высокого класса точности.

Вообще, несколько преобразовав выражение (36)

$$K_{о.с}=\frac{K}{1+\beta K}=\frac{1}{\frac{1}{K}+\beta}, \qquad (39)$$

можно видеть, что при больших значениях K рабочее усиление $K_{о.с}$ зависит почти только от значения β. Последнее же можно установить с точностью, вполне достаточной для большинства применений.

Конкретные схемы УПТ, в которых осуществлена отрицательная обратная связь, рассматриваются в гл. 5.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПРАКТИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ И ИЗМЕРИТЕЛИ СИГНАЛОВ «ПОСТОЯННОГО» ТОКА

17. МНОГОДИАПАЗОННЫЕ ПИКОАМПЕРМЕТРЫ

В настоящее время в технике и научных исследованиях наиболее часто используется диапазон малых токов от 10^{-5} до 10^{-12}*а*, т. е. от 10 *мка* до 1 *па*. Это область рабочих токов датчиков (фотоэлементов, ионизационных камер, газоразрядных счетчиков, фотоэлектронных умножителей и пр.). Внутреннее сопротивление большей части этих датчиков весьма велико, что позволяет применять достаточно простые по схеме УПТ прямого усиления с высокоомными сопротивлениями на входе.

При расчете входной цепи таких УПТ исходят из следующих соображений. Пусть задан минимальный измеряемый ток $I_{вх.мин}$. Этот ток обычно соответствует примерно $^1/_{10}$ шкалы поддиапазона наибольшей чувствительности. Цена шкалы, таким образом, составляет около $10I_{вх.мин}$. Погрешность за счет дрейфа, как правило, не должна превышать 2% в час. Так как в стабилизирован-

ном УПТ после начального прогрева дрейф приблизительно равен 2 *мв/ч*, то целесообразно выбрать чувствительность полного отклонения прибора (по напряжению) $U_{\text{вх.макс}} \geqslant 2 \cdot 10^{-3}/2 \cdot 10^{-2} \geqslant 0{,}1$ *в*. Отсюда рассчитываем величину входного сопротивления для поддиапазона наибольшей чувствительности:

$$R_{\text{вх.макс}} \approx \frac{U_{\text{вх.макс}}}{10 I_{\text{вх.мин}}}.$$

Если, например, $I_{\text{вх.мин}} = 10^{-12} a$, то $R_{\text{вх.макс}} = 0{,}1/10 \times \times 10^{-12} = 10^{10}$ *ом*. Сопротивления для остальных поддиапазонов будут соответственно меньше.

Схема подобного пикоамперметра приведена на рис. 33. Входной каскад собран по схеме катодного повторителя на лампах типа 6Ж7 или 6Ж1Ж, из которых лампа $Л_1$ — ра-

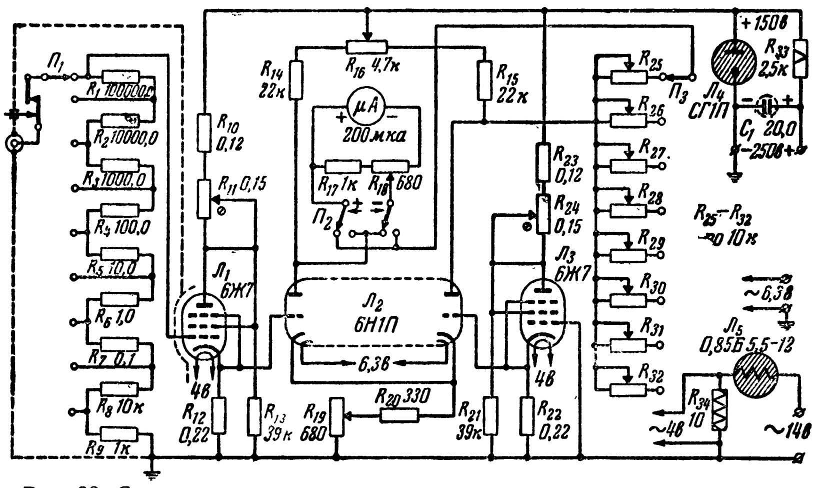


Рис. 33. Схема многопредельного пикоамперметра на приемно-усилительных лампах.

бочая, а $Л_3$ — уравновешивающая. Лампа $Л_1$ работает в электрометрическом режиме II; подбор оптимального анодного напряжения производится регулировкой сопротивления R_{11}. Изменение пределов измерений осуществляется при помощи переключателя (с керамической платой) $П_1$, соединяющего вход прибора с соответствующим сопротивлением. При этом суммарное сопротивление в цепи сетки лампы $Л_1$ остается без изменения, что способствует

большей устойчивости режима. Катоды ламп $Л_1$ и $Л_3$ соединены с сетками лампы $Л_2$ балансного оконечного каскада (так как в этом УПТ напряжение входного сигнала достаточно велико, то ПУН не нужен). Показывающий прибор (микроамперметр μA типа М-24 на 200 *мка*) включен между анодами лампы $Л_2$ через сопротивления R_{25} — R_{32}, переключаемые (переключателем $П_3$) одновременно с входными сопротивлениями R_1 — R_9. При помощи сопротивлений R_{25} — R_{32} при градуировке пикоамперметра корректируется расхождение пределов измерений между поддиапазонами, которое обусловлено разбросом величин высокоомных входных сопротивлений. Установка нуля производится при помощи сопротивления R_{16}, а установка общей чувствительности — при помощи шунта R_{18}. Переменное сопротивление R_{19} в цепи катода лампы $Л_2$ служит для подбора правильного режима. Для работы с сигналами обеих полярностей предусмотрен переключатель $П_2$. Питание накала ламп $Л_1$ и $Л_3$ стабилизировано бареттером $Л_5$, а анодное питание — стабилитроном $Л_4$.

Технические данные прибора следующие: число поддиапазонов 9; токи полного отклонения от $5 \cdot 10^{-12}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ *а*; постоянная времени входа около 2 *сек;* минимальный измеряемый ток 0,5 *па*; дрейф (после получасового прогрева) не более 2 *мв/ч* в первые 2 *ч,* затем около 10 *мв* за 10 *ч;* нелинейность показаний не более $\pm 3\%$ шкалы; расхождение показаний при переключении полярности не более $\pm 2\%$ шкалы; расхождение между поддиапазонами меньше 3% от $5 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-8}$*а* и меньше 6% на остальных поддиапазонах; неустойчивость градуировки меньше 5% в год; дрейф по питанию около 1 *мв* на 1% изменения напряжения электросети; потребляемая от электросети мощность около 25 *вт*. Расхождение между поддиапазонами и неустойчивость градуировки обусловлены главным образом свойствами высокоомных сопротивлений.

Прибор (размерами $250 \times 220 \times 200$ *мм*) собран на шасси с наклонной передней панелью. Входной каскад вместе с платой переключателя $П_1$ заключен в массивный экран, отделяющий монтаж сеточной цепи лампы $Л_1$ от остальных частей прибора. Опыт показал, что этот пикоамперметр прост в наладке и градуировке, надежен в эксплуатации, устойчив и долговечен (многие экземпляры работают по 3 000 *ч* и более без смены ламп $Л_1$ и $Л_3$). Благодаря этим качествам такие приборы широко используются в производственных условиях.

Следует отметить, что для первого каскада вместо пентодов $Л_1$ и $Л_3$ лучше применить двойной электрометрический тетрод типа ЭМ-5 (схема входного каскада с этой лампой приведена на рис. 20,*б*). При этом одну из управляющих сеток двойного тетрода следует заземлить, а его аноды соответственно соединить с сетками лампы $Л_2$. Сопротивление R_{20} в цепи катодов этой лампы нужно увеличить примерно до 3 *ком,* а сопротивление R_{34} в цепи бареттера $Л_5$ следует изменить в соответствии с током накала тетрода (бареттер можно заменить другим, например типа 0,425Б5,5-12).

Технические данные пикоамперметра с лампой типа ЭМ-5 существенно улучшаются: временной дрейф снижается до 3—5 *мв* за 10 *ч,* нелинейность до $\pm 1\%$, расхождение показаний при переключении полярности до $\pm 0{,}5\%$, дрейф по питанию до ± 5 *мв* на ± 15-процентное изменение напряжения электросети. Чувствительность полного отклонения прибора (по напряжению) возможно довести до 0,1 *в* (вместо 0,5 *в* с пентодами типа 6Ж1Ж), что соответствует чувствительности по току $1 \cdot 10^{-12} a$.

18. МНОГОДИАПАЗОННЫЕ УПТ ПРЯМОГО УСИЛЕНИЯ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Точность приборов, собранных по схеме рис. 33, и устойчивость их градуировки существенно зависят от качества входных сопротивлений и от изоляции платы переключателя $П_1$. Старение сопротивлений и ламп второго каскада также может вызвать изменение параметров УПТ. С целью повышения стабильности и точности целесообразно ввести отрицательную обратную связь и упростить переключения в высокоомной входной цепи; изменяя глубину отрицательной обратной связи, можно изменять пределы измерений.

Схема УПТ, в которой осуществлены эти меры, приведена на рис. 34. Входная лампа $Л_1$ работает в электрометрическом режиме II. Усилитель на лампе $Л_1$ и левых (по схеме) триодах ламп $Л_2$ и $Л_3$ имеет коэффициент усиления без обратной связи около 10^4. Правый (по схеме) триод лампы $Л_2$ служит для компенсации температурного катодного дрейфа, а правый триод лампы $Л_3$ является катодным повторителем. С калиброванного делителя $R_{17} — R_{21}$ снимается напряжение обратной связи, меняющей усиление от 100 до 1. В этом УПТ с входным сопротивлением $10 \cdot 10^9$ *ом* перекрывается диапазон токов от $5 \cdot 10^{-12} a$ до

$0{,}5 \cdot 10^{-9}$ *а*. Остальные поддиапазоны от $50 \cdot 10^{-9}$ *а* до $5 \cdot 10^{-6}$ *а* перекрываются при подключенных сопротивлениях R_2 и R_3.

УПТ прямого усиления с отрицательной обратной связью применяются не только в измерительных устройствах, но и в автоматике, а также в счетно-решающих устройствах. Существенный недостаток приборов этого вида (в случае работы с непереключаемым входным сопротивле-

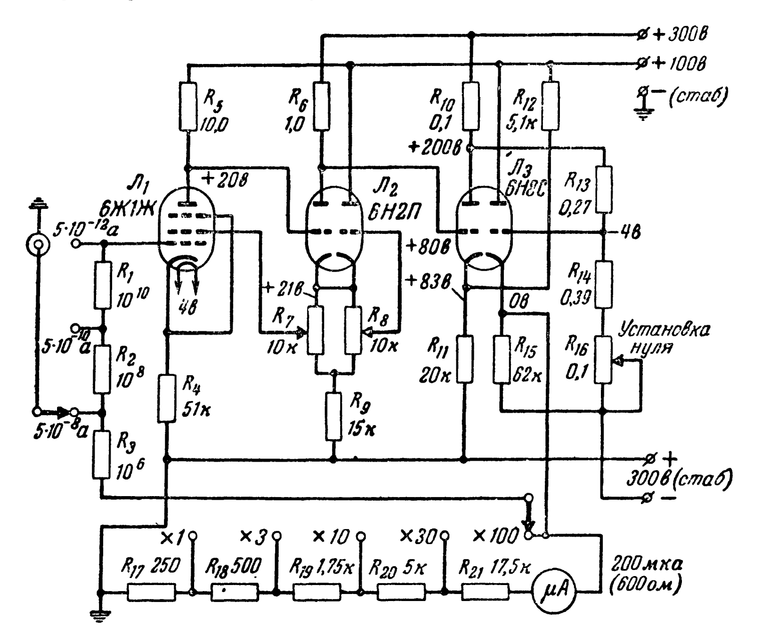


Рис. 34. Схема многопредельного измерительного УПТ с отрицательной обратной связью.

нием) состоит в большом падении напряжения на входе при работе на диапазонах малой чувствительности. Вследствие этого они не могут полностью заменить простые приборы, собранные по схемам, сходным с показанной на рис. 33.

Благодаря относительно низкоомному делителю расхождение между поддиапазонами в УПТ по схеме рис. 34 может быть уменьшено до $\pm 1\%$. Однако абсолютная погрешность здесь зависит от качества включенных на входе сопротивлений, так же как и в приборах, работающих по схеме рис. 33. Для уменьшения погрешности измерения

малых токов необходимы высокостабильные и точно калиброванные сопротивления в диапазоне $10^8 - 10^{12}$ *ом*.

Повышение точности измерений возможно и путем уменьшения дрейфа. Последнее позволило бы работать при меньших значениях $U_{вх}$ и соответственно меньших, но более точных сопротивлениях $R_{вх}$.

19. УПТ С ВХОДНЫМ ПРЕРЫВАТЕЛЕМ

Один из способов существенного уменьшения дрейфа состоит в преобразовании сигнала постоянного тока в переменное напряжение посредством механических (контактных) прерывателей. Принцип действия УПТ этого вида описан в § 2. Частота прерываний обычно берется равной

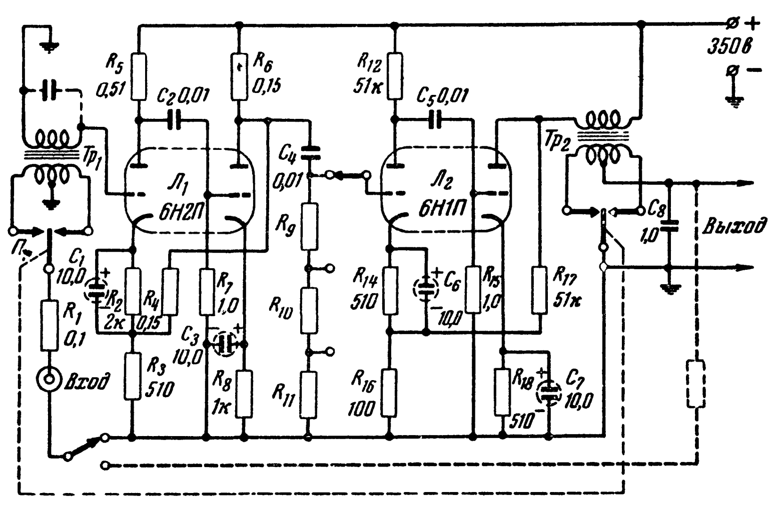


Рис. 35. Схема УПТ с входным прерывателем.

либо частоте сетевого напряжения f_c, либо $2f_c$. Наряду со специальными конструкциями часто в качестве прерывателей применяют тщательно отрегулированные поляризованные реле типов РП4 или РП5 с платиновыми контактами.

На рис. 35 приведена схема простого и надежного в эксплуатации УПТ с двумя синхронизированными прерывателями; второй прерыватель $П_2$ работает в каскаде демодулятора, собранного по схеме механического (синхронного) выпрямителя.

Прерыватели приводятся в движение миниатюрным электродвигателем. Усилитель (ПУН) собран на двух двойных триодах, каждый из которых работает в схеме с отрицательной обратной связью. Для управления чувствительностью служит делитель из сопротивлений R_9 — R_{11}. Можно применить для этого и отрицательную обратную связь (цепь которой показана пунктиром). В этом случае делитель R_9 — R_{11} исключается.

При тщательном выполнении прерывателей (точечные золотые контакты, отсутствие скольжения, дребезжания и др.), хорошей экранировке, герметизации всей входной части и отдельных экранах на трансформаторе и прерывателях чувствительность полного отклонения прибора составляет около 1 *мв* при помехах менее 50 *мкв* и входном сопротивлении около 0,2 *Мом*. При расчетной нагрузке трансформатора Tp_2 600 *ом* крутизна $S_у \approx 10$ *ма/мв*. Дрейф не превышает 50 *мкв* в сутки (после 40—60 *ч* тренировки прерывателей).

Кроме простейшего механического демодулятора в УПТ со входными прерывателями применяют демодуляторы типа фазового (синхронного) детектора, схемы которых весьма разнообразны. На рис. 36 приведены наиболее употребительные в настоящее время схемы, основные преимущества которых состоят в простоте и надежности.

Схема на рис. 36,*а* представляет собой мостовой демодулятор. Трансформатор Tp_1 включен на выходе последнего каскада ПУН. Его вторичная обмотка питает диодный мост. В диагональ моста включена вторичная обмотка трансформатора Tp_2, первичная обмотка которого питается напряжением $U_{пр}$ от общей линии с катушкой возбуждения входного прерывателя.

Демодулятор по схеме на рис. 36,*б* работает на двух диодах и имеет симметричный выход, хорошо согласуемый с балансным оконечным каскадом. Демодуляторы на усилительных триодах или гептодах применяются сравнительно редко из-за их нестабильности и большой зависимости их характеристик от параметров ламп.

На рис. 36,*в* приведена упрощенная схема УПТ с комбинированным (одноякорным) прерывателем-демодулятором $П_д$, заземленный якорь которого поочередно замыкает вход и выход УПТ на „землю". Прерыватель отрегулирован так, что в момент переключения происходит „перекрытие" контактов. При замкнутом выходе конден-

сатор $C_{вх}$ заряжается током сигнала, а при замыкании входа он разряжается через сопротивление $R_с$. Возникающий при разряде импульс усиливается и заряжает конденсатор $C_{вых}$. При переходе якоря в правое (по схеме) положение выход снова замыкается и конденсатор $C_{вых}$ частично разряжается. Разряд его происходит значительно

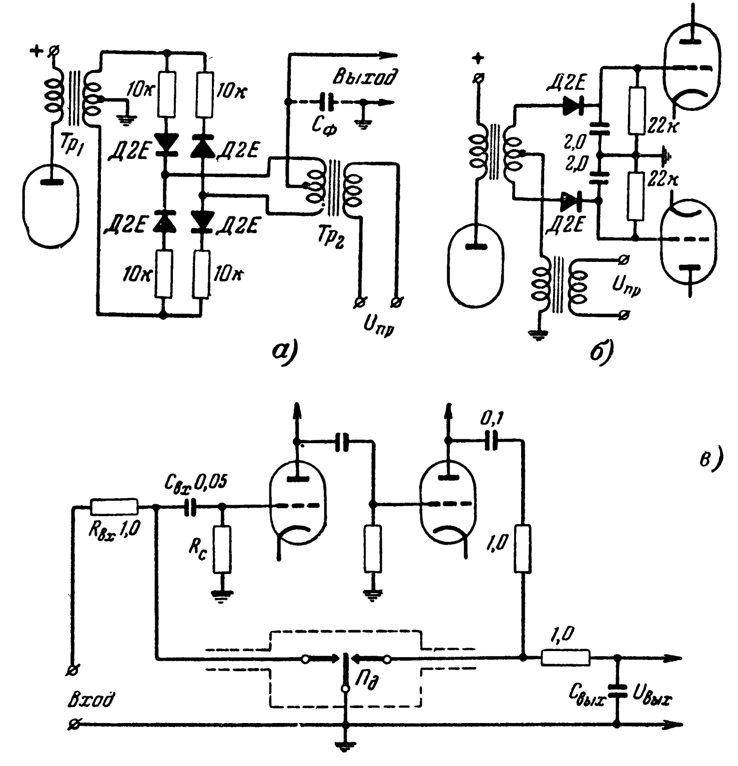


Рис. 36. Схемы демодуляторов.

медленнее заряда, так как скорость заряда пропорциональна амплитуде выходного импульса, а скорость разряда — среднему значению $U_{вых}$. При перемене полярности напряжения на входе меняется и полярность выходного напряжения. Во избежание самовозбуждения усилителя требуется тщательная экранировка прерывателя и проводников входа и выхода.

Имеются сообщения об измерительных УПТ с высококачественными входными вибропреобразователями, позволяющими не применять синхронных демодуляторов, вместо которых на выход усилителя включают простой диодный мост. Стабильность таких приборов обеспечивается глубокой отрицательной обратной связью. Приведенные ко входу дрейф и шумы прибора составляют менее 25 *мкв* при сопротивлении входа около 5 *Мом.*

20. УПТ С ВХОДНЫМ ЕМКОСТНЫМ МОДУЛЯТОРОМ

Экспериментальные данные, опубликованные многими конструкторами и научными работниками, дают основание полагать, что наименьшим дрейфом при высоком входном сопротивлении обладают УПТ со входным модулятором в виде виброконденсатора (динамического конденсатора). На рис. 37 приведена схема одного из УПТ такого типа.

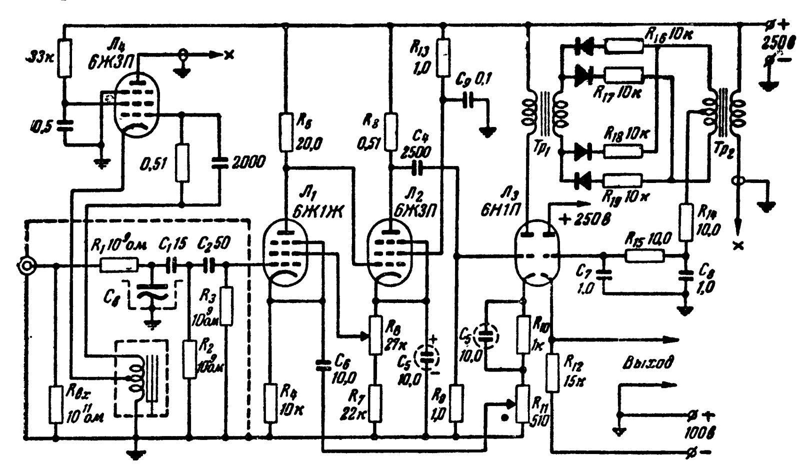


Рис. 37. Схема УПТ с емкостным модулятором.

Следует учесть, что свойства как УПТ с входными прерывателями, так и УПТ с входными виброконденсаторами сравнительно мало зависят от схемы и почти полностью определяются качеством входного модулятора. Изготовление виброконденсатора «высшего класса» является очень трудной задачей и едва ли возможно в условиях радиолюбительской мастерской. Заметим, что УПТ с виброконденсаторами, при изготовлении которых не соблюдалась точность и «сверхчистота» сборки, могут иметь большие дрейф

и шумы и уступать хорошо налаженному УПТ с прямым усилением.

Описываемый УПТ предназначен для авторегулирующих систем и является одним из самых простых приборов этого вида. Ток входного сигнала протекает через сопротивление $R_{вх}$, которое может быть либо переключаемым (как в схеме на рис. 33), либо сменным. Максимальная величина $R_{вх}=10^{12}-10^{13}$ *ом*. Через сопротивление R_1 входное напряжение поступает на неподвижную пластину виброконденсатора $C_в$. Эта пластина должна быть тщательно изолирована (тефлоном, полистиролом) и иметь минимально возможную емкость относительно корпуса.

Подвижная пластина (вибратор) виброконденсатора представляет собой упругую пластинку с собственной частотой около 500 *гц*. Она заземлена, благодаря чему достигается хорошая экранировка неподвижной пластины. Катушка возбуждения виброконденсатора имеет средний вывод и входит в схему генератора (лампа $Л_4$) как часть его контура, благодаря чему вся система работает на собственной частоте вибратора.

Входной каскад на лампе $Л_1$ работает в микротоковом режиме при напряжении накала лампы около 4 *в* и напряжении на аноде около 20 *в*, чем обеспечиваются незначительные шумы и малый сеточный ток. Второй каскад на лампе $Л_2$, связанный гальванически со входным каскадом, работает в режиме, близком к обычному для усилителей низкой частоты. Третий каскад на левом (по схеме) триоде лампы $Л_3$ нагружен демодулятором (работающим по мостовой схеме), выходное напряжение которого через фильтр $R_{14}R_{15}C_7C_8$ поступает на сетку правого (по схеме) триода лампы $Л_3$ оконечного каскада. С катодного сопротивления R_{11} левого триода лампы $Л_3$ снимается напряжение отрицательной обратной связи, стабилизирующей общее усиление первых трех каскадов на уровне около 2 000.

При питании накала постоянным током и отборном экземпляре входной лампы собственный шум усилителя не превышает 10 *мкв*, что для сигнала, развивающего на входе 0,1 *мв*, соответствует отношению сигнал/шум более 10. Коэффициент преобразования виброконденсатора составляет примерно 0,2, следовательно, входной ток 10^{-15} *а*, развивающий на входном сопротивлении 10^{12} *ом* напряжение 1 *мв*, создает на входе усилителя сигнал 0,2 *мв*, в 20 раз превышающий шум. Разумеется, сигнал 0,2 *мв* не должен

сопровождаться фоном собственных и наведенных помех. Этот простой расчет еще раз показывает значение высокого качества виброконденсатора.

21. ШИРОКОПОЛОСНЫЕ УПТ

Почти все рассмотренные выше системы УПТ относятся к усилителям главным образом «медленных» сигналов, длительность изменения величины которых составляет не менее 10^{-4} *сек*, а как правило — 10^{-1} *сек* и более. Однако существует необходимость усиливать и небольшие «быстрые» сигналы, содержащие постоянную составляющую,

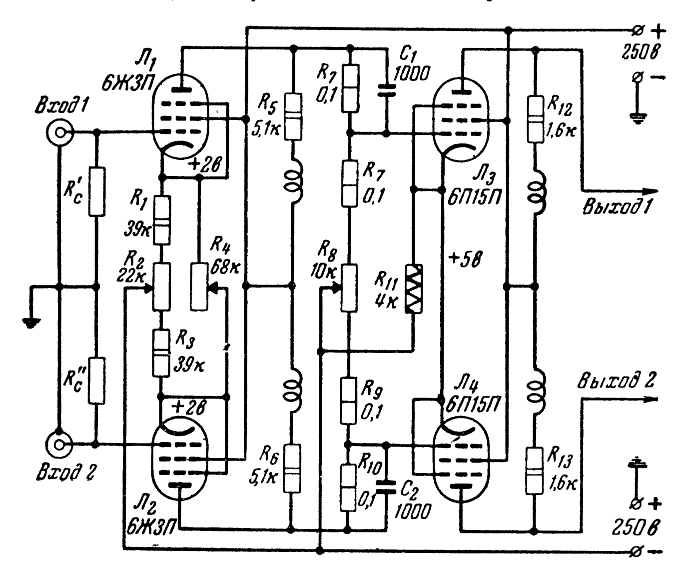


Рис. 38. Схема широкополосного УПТ балансного типа.

причем время прохождения этих сигналов может быть порядка долей микросекунды. В этом случае применяют УПТ, в которых анодно-сеточные цепи ламп рассчитаны на пропускание полосы частот от нескольких мегагерц до «постоянного» тока (0 *гц*). Отличие их от описанных выше УПТ состоит в использовании пентодов со сравнительно низкоомными сопротивлениями в анодных цепях $(R_a \ll R_i)$, в малоемкостном монтаже и наличии корректирующих катушек.

Как известно, достаточный коэффициент усиления в ши-

рокополосном каскаде достигается за счет большой крутизны характеристики ламп, так как $K \approx R_a S$. Режим, при котором обеспечивается большая крутизна, резко отличается от режима малых сеточных токов. Поэтому, как правило, широкополосные УПТ имеют сравнительно низкоомный вход и низкую чувствительность по току.

На рис. 38 приведена схема УПТ с полосой 0—3 *Мгц* и усилением около 200. Усилитель собран по сквозной балансной схеме с большими сопротивлениями в цепях катодов ламп, благодаря чему достигается хорошее симметрирование (при подаче сигнала только на один из входов несимметричность сигнала на выходе не превышает 10%). Сопротивление R_4 служит для плавной регулировки усиления в пределах от 20 до 200, а сопротивления R_2 и R_8 нужны для балансировки первого и второго каскадов.

Дрейф нуля после получасового прогрева в этом УПТ не превышает 20 *мв/ч*. Максимальное выходное напряжение составляет ± 50 *в* относительно начального уровня по каждому плечу. Усилитель используется в широкополосных осциллографах и в схеме дифференциальных измерений.

22. АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ДРЕЙФА И АВТОРЕГУЛИРОВАНИЕ НУЛЕВОГО УРОВНЯ УПТ

Способы уменьшения дрейфа, описанные в гл. 3 и 4, являются в сущности параметрическими; система УПТ прямого усиления не защищена от случайных «сдвигов» нуля, хотя их вероятность и сведена к некоторому минимуму. Значительно надежнее в этом отношении УПТ с прерывателями или виброконденсаторами. Но вследствие низкой частоты модуляции и большой постоянной времени в цепи демодулятора они имеют разрешающее время не менее 10—100 *мсек* и поэтому не могут заменить быстродействующих УПТ прямого усиления в ряде важных применений, например в системах авторегулирования или в математических машинах. Таким образом, максимальное снижение дрейфа является одной из главных проблем в области УПТ; на ее разрешение затрачивается много усилий.

В 1946—1947 гг. была предложена система компенсации дрейфа, которую образно можно назвать «автоматическим оператором». Как известно, с целью установки нуля оператор выключает входной сигнал, отмечает по показаниям выходного прибора УПТ величину дрейфа, а затем

при помощи соответствующего регулятора возвращает показания прибора на нуль. Эти функции были возложены на систему реле, периодически переключавшихся в положения «работа» — «компенсация дрейфа». В зависимости от скорости дрейфа УПТ и от необходимой точности частота переключений выбиралась в пределах 0,01—10 *гц*.

На рис. 39 показана принципиальная схема такой автоматической компенсации дрейфа. Контакты реле *Р*, возбуждаемого генератором *Г*, периодически переключают

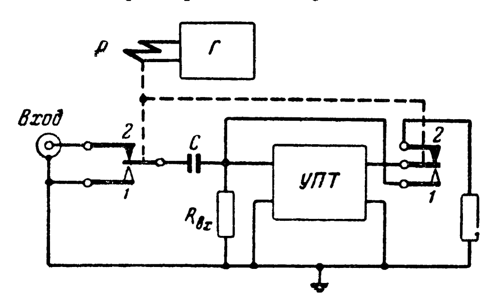


Рис. 39. Схема автоматической компенсации дрейфа нуля.

вход УПТ из положения *1* (компенсация) в положение *2* (работа). Емкость конденсатора *С* выбирается такой, чтобы $R_{вх}C \gg T_п$, где $T_п$ — длительность цикла переключения; благодаря этому заряд конденсатора можно считать неизменным в течение рабочего промежутка. В положении *1* выход УПТ соединяется со входом (т. е. он охватывается 100-процентной отрицательной обратной связью), конденсатор *С* включается параллельно входу, и если на выходе имеется напряжение дрейфа $U_{др}$, то конденсатор заряжается до напряжения

$$U'_{др} = U_{др}\left(1 + \frac{1}{K}\right), \qquad (40)$$

где *К* — коэффициент усиления.

После переключения реле в положение *2* конденсатор оказывается включенным между источником сигнала и входом УПТ. Благодаря большой емкости он сохраняет („запоминает") заряд в течение времени $T_п$, и его можно рассматривать как некую батарею, э. д. с. которой равна $U'_{др}$. Полярность этой э. д. с. обратна полярно-

сти $U_{др}$ и, таким образом, напряжение дрейфа оказывается скомпенсированным. Компенсация тем лучше, чем больше K, так как в этом случае $U'_{др} \approx U_{др}$.

Возможности уменьшения дрейфа ограничиваются здесь паразитными сигналами, обусловленными контактными потенциалами и их изменениями. Тщательно выполненный переключатель с точечными (острийными) контактами из специального сплава (Au—94%, Ni—5%, Mn—1%) вносит дрейф всего лишь около 5 *мкв* в сутки, а вся компенсированная установка УПТ — 20 *мкв* в сутки. Однако пока такие переключатели и усилители существуют лишь в лабораторном исполнении. При использовании типовых реле типов РП4 и РП5 с платиновыми контактами дрейф небалансного УПТ составляет около 200 *мкв* в сутки (дрейф без компенсации—около 1 *мв/ч*).

Недостатком этой системы компенсации дрейфа является прерывистость работы УПТ. В тех случаях, когда перерывы недопустимы, соединяют два входных каскада УПТ так, что промежуток компенсации одного из них совпадает с рабочим промежутком второго. В таком устройстве, однако, сильно усложняется система переключений.

С целью обеспечить непрерывность компенсации дрейфа в 1950—1955 гг. была разработана система, состоящая из усилителя прямого усиления с малым разрешающим временем, но с большим дрейфом и усилителя со входным преобразователем, обладающего малым дрейфом, но зато большим разрешающим временем. Схема включения усилителей показана на рис. 40.

Усиление первого (главного) усилителя без обратной связи обозначим через K_1, а второго (вспомогательного) — через K_2. Первый усилитель охвачен сильной отрицательной обратной связью (ее коэффициент β), благодаря которой постоянная времени входа снижается в $1+\beta K_1$ раз, причем на вход главного УПТ поступает с его выхода напряжение дрейфа $\frac{U_{др1}}{\beta} = U'_{др1}$. Это напряжение усиливается вторым усилителем и с его выхода поступает на второй вход дифференциального входного каскада главного усилителя.

Математический анализ этой схемы показывает, что при больших ($>1\,000$) значениях K_1 и K_2 дрейф главного усилителя должен быть ослаблен в $\beta(1+K_2)$ раз, но при этом дрейф второго усилителя $U_{др2}$ усиливается прибли-

зительно в $\frac{1}{\beta}$ раз. Следовательно, целесообразно иметь большие величины K_2 и β.

Приведем числовой пример. Пусть дрейф главного усилителя $U_{\text{др1}} = 20$ *мв*, вспомогательного $U_{\text{дв2}} = 0{,}2$ *мв*, $K_2 = 2\,000$, а $\beta = 0{,}5$. Дрейф главного усилителя уменьшается до $U'_{\text{др}} = \frac{20}{0{,}5(1+2\,000)} \approx 0{,}02$ *мв*, но к нему до-

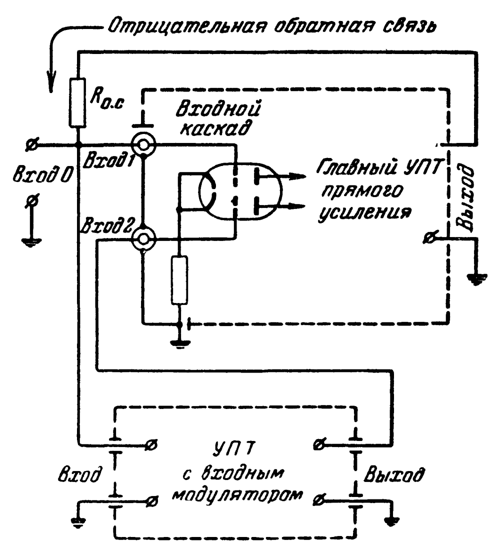


Рис. 40. Схема стабилизации нулевого уровня УПТ.

бавляется усиленный дрейф второго усилителя $U_{\text{др2}} = \frac{0{,}2}{0{,}5} = 0{,}4$ *мв*. Таким образом, в худшем случае, т. е. если направления $U_{\text{др1}}$ и $U_{\text{др2}}$ совпадут, результирующий дрейф составит 0,42 *мв*—в 50 раз меньше начального $U_{\text{др1}}$. При этом главный УПТ сохраняет все преимущества прямого усиления.

Первый усилитель собирается по одной из схем, приведенных на рис. 38 или 34, а второй — по схеме, сходной с приведенными на рис. 35 или 37, поэтому мы не приводим полной схемы устройства. На рис. 41 приведены типичные схемы смесительной части.

Опыт и расчеты показывают, что ни одна из описанных схем не позволяет полностью уничтожить дрейф нуля. Однако применение этих схем дает возможность уменьшить

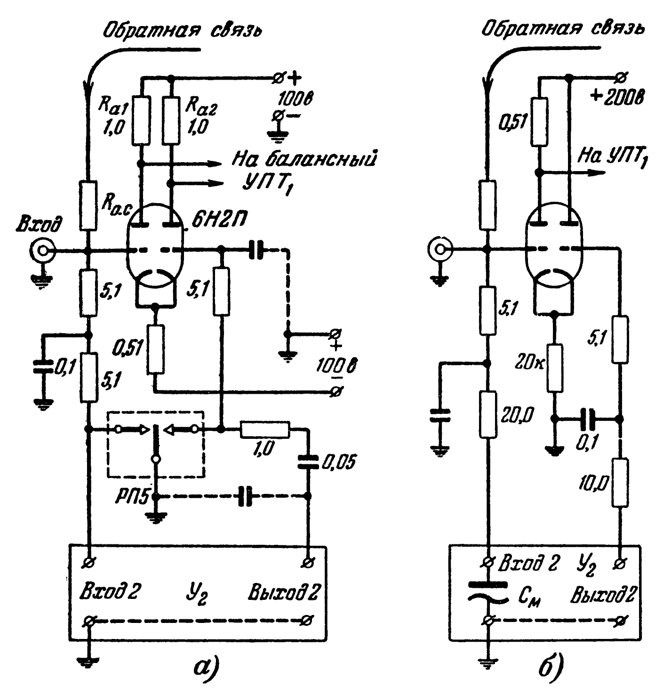


Рис. 41. Схемы входных смесителей УПТ со стабилизированным нулевым уровнем.

дрейф до незначительной величины (порядка 100 *мкв*), что весьма важно для ответственных систем авторегулирования и управления, для моделирующих математических машин и т. п., а также для точных измерительных устройств.

23. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ПИТАНИЯ, КОНСТРУКЦИИ, МОНТАЖА И СБОРКИ УПТ

Питание большей части УПТ должно производиться от стабилизированных источников. Выбор того или иного варианта схемы питающего устройства зависит от конкретных условий и от требуемой чувствительности прибора. В УПТ с малым числом каскадов и небольшой (порядка 0,5 *в*) чувствительностью достаточно стабилизировать анодное пи-

тание стабилитроном, а накал — бареттером. Многокаскадные УПТ с большим усилением требуют электронной стабилизации анодного питания, причем целесообразно питать от того же стабилизатора и накал ламп, соединив подогреватели последовательно и применяя лампы с небольшим током накала (например, лампы 12-вольтной серии). При этом цепь накала может быть использована как делитель напряжения для питания входного и промежуточных каскадов.

Стабилизация накала, как показывает опыт, необходима почти для всех УПТ, в том числе и для балансных, а также для УПТ, охваченных обратной связью. Дело в том, что даже тщательная балансировка компенсирует температурный дрейф катодов лишь в сравнительно узких пределах колебания напряжения накала, а отрицательная обратная связь, стабилизируя усиление и уменьшая его зависимость от напряжений питания, не уменьшает существенно температурного катодного дрейфа. В большинстве случаев можно считать достаточной стабилизацию, обеспечиваемую феррорезонансными стабилизаторами.

Если УПТ не предназначен для усиления быстропротекающих процессов, то величина пульсации анодного напряжения может быть допущена до 1%. Главным требованием к источникам анодного питания и смещения является максимальная устойчивость напряжения во времени. Современные электронные стабилизаторы имеют суммарную неустойчивость не более ±0,1% за 10 *ч* работы (после предварительного прогрева) при изменении напряжения электросети на ± 10%, что удовлетворяет требованиям большинства УПТ.

Питание УПТ малой чувствительности (10^{-6} — 10^{-8} *а*) можно производить переменным или выпрямленным несглаженным током. Пульсация сигнала при этом сглаживается конденсатором, включенным параллельно выходу УПТ. Подобные УПТ часто используются в сигнальных или индикаторных устройствах, а также в авторегулирующих устройствах, например для управления скоростью вращения электродвигателей.

Конструкция шасси, размещение ламп и деталей оконечного и промежуточных каскадов УПТ, как правило, соответствуют нормам радиоэлектронной аппаратуры и обычно согласуются с той установкой, в которую входит УПТ. При работе в условиях сильных сотрясений и вибрации, которые могут вызвать сдвиг электродов ламп и смещение

нулевой точки УПТ, полезна простая амортизация в виде мягкой прокладки или подвеса. Важно обеспечить надежные металлические контакты между шасси, панелями, кожухами, стойками и всеми заземленными частями.

При конструировании входного каскада УПТ необходимо иметь в виду следующие основные требования. Входная емкость должна быть минимальной, а сопротивление изоляции входной цепи — максимальным. Все токонесущие части необходимо экранировать от сетки входной лампы достаточно массивными экранами. Любые перемещения (качание, вибрация) проводника и изменения напряжения на нем могут вызвать движение зарядов (вследствие изменения поля), которое сеточный ввод уловит как помехи. Поэтому монтаж входного каскада УПТ, в особенности его сеточной цепи, должен быть выполнен жесткими и короткими соединительными проводами. Применение разного рода изоляционных «чулков» на монтажных деталях здесь недопустимо. Необходимо также экранировать от остальных частей устройства переключатели и сопротивления входа. Выполнение этих требований должно быть тем жестче, чем выше входное сопротивление и чувствительность УПТ. Полезно помнить следующее правило: сетка входной лампы УПТ не должна «видеть» проводов анода и накала.

В УПТ, предназначенных для авторегулирования промышленных объектов, часто применяется отдельный блок входного каскада (выносная головка). При конструировании такого блока желательно обеспечить герметичность его корпуса и предусмотреть место в нем для капсюля с осушителем (типа силикагеля). Чтобы свести к минимуму термоэлектрические токи, в корпусе необходимо избегать стыков разнородных металлов и по возможности уменьшить число паек.

При токе сигнала порядка 10^{-12} *а* или больше в качестве изоляторов можно употреблять полированное органическое стекло или полистирол, а при токе менее 10^{-12} *а* и входном сопротивлении более 10^{11} *ом* следует применять тефлон (фторопласт-4). Янтарь в качестве изолятора применять не рекомендуется из-за его дороговизны и трудной обработки, а кварц или стекло применять вообще не следует, так как их поверхность очень гигроскопична и сопротивление изоляции может изменяться в $10^3 - 10^6$ раз при естественных колебаниях влажности окружающего воздуха. В случае же неизбежности применения стеклянных или

кварцевых изоляторов их поверхность должна быть обработана кремнийорганическими соединениями с целью придания им водоотталкивающих свойств.

Пайки должны производиться с помощью чистой канифоли, без применения каких-либо паяльных паст, в том числе и «бескислотных», которые очень часто содержат вещества, вредно влияющие на качество изоляторов.

Сборку входных каскадов и блоков нужно производить только в чистых, хорошо вентилируемых помещениях, защищенных от пыли и от попадания каких бы то ни было испарений, могущих ухудшить изоляцию деталей. Сборщик при этом не должен прикасаться голой рукой к деталям сеточной цепи входной лампы УПТ.

Детали должны быть перед сборкой тщательно очищены; хранить их следует в плотно закрытых коробках.

ЛИТЕРАТУРА

Туричин А. М., Электрические измерения неэлектрических величин, Госэнергоиздат, 1959.

Агейкин Д. И. и др., Датчики систем автоматического контроля и регулирования, Машгиз, 1959.

Гущин Ю. В. и др., Применение радиоактивных излучений в устройствах автоматического контроля, «Автоматика и телемеханика», 1957, XVIII, № 9.

Лопатин Б. А., Ламповые гальванометры постоянного тока, Госэнергоиздат, 1952.

Чечик Н. О., Файнштейн С. М., Лифшиц Т. М., Электронные умножители, Гостехиздат, 1957.

Брейдо И. Я., Фотоэлектронные умножители и их применения, «Радио», 1956, № 7 и 9.

Александров А. В., Счетчики невидимых частиц и излучений, Гостехиздат, 1958.

Брейдо И. Я., Счетный прибор на декатронах, «Радио», 1958, № 6.

Бонч-Бруевич А. М., Применение электронных ламп в экспериментальной физике, Гостехиздат, 1956.

Байда Л. И., Семенкович А. Л., Электронные усилители постоянного тока, Госэнергоиздат, 1953.

Заруцкий Ю. Ф., Сеточные токи, расчет и конструирование электрометрических ламп, Сборник материалов по вакуумной технике, выпуск XXII, Госэнергоиздат, 1960.

Честнат Г., Майер Р., Проектирование и расчет следящих систем и систем регулирования, ч. II, Госэнергоиздат, 1959.

Соколов А. А., Мостовые балансные схемы усилителей постоянного тока, «Автоматика и телемеханика», 1956, XVIII, № 4.

Коган Б. Я., Электронные моделирующие устройства и их применение для исследования систем автоматического регулирования, Физматгиз, 1959.

Полонников Д. Е., Электронные усилители автоматических компенсаторов, Физматгиз, 1960.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 20 коп.